



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Caracterización oceanográfica de la Bahía de Inhambane (Mozambique)

Trabajo realizado por:

**Natalia Barón Quevedo**

Dirigido por:

**Manel Grifoll Colls y Manuel Espino Infantes**

**Gorka Solana** (Director externo, UP-Maxixe)

Máster en:

**Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos**

Barcelona, **Junio 2018**

Departamento ECA – Departament d' Enginyeria Civil  
i Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**



## RESUMEN

La Bahía de Inhambane, en la costa sur de Mozambique, es una zona inexplorada hasta ahora, por lo que no se conoce ningún estudio hidrodinámico contrastado. En este contexto, el presente trabajo pretende realizar una caracterización oceanográfica del estuario, apoyándose en los datos resultantes de una campaña “in situ”, en la que participé personalmente y que tuvo lugar durante el verano de 2017.

A través del tratamiento de mediciones CTD y del análisis de trayectorias realizadas por boyas de deriva, este trabajo presenta un estudio de las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad en el interior de la bahía; la estimación de la renovación del agua mediante el prisma de marea; la caracterización de las corrientes de marea presentes en la zona y la obtención de patrones de comportamiento diario. Finalmente, a través del análisis de los resultados obtenidos, se describe del comportamiento y el tipo de estuario objeto de estudio.

La Bahía de Inhambane resulta ser un estuario bien mezclado, sin estratificación significativa, y con una circulación lateral horaria que permite la renovación de la masa de agua cada 40 días aproximadamente. Las variables hidrodinámicas más relevantes presentan perfiles de verticalidad homogénea, con rangos que se sitúan entre los 21 y 24.5 °C de temperatura; 26 y 36 PSU de salinidad; y entre 17 y 25 kg/m<sup>3</sup> de densidad. Ésta última queda totalmente influenciada por la salinidad, presentando perfiles análogos.

Existe una leve zonificación dentro de la Bahía, marcada por las corrientes y características hidrodinámicas existentes, dividiéndola en el *Canal Lateral*, el estuario de *Morrumbene*, el *Canal Central* y el *Canal da Ilha*. Esta partición nos permite cualificar la influencia del agua dulce, que prácticamente se restringe al inicio de la Bahía, donde la aportación de aguas provenientes de los ríos interiores es mayor.

Las mareas existentes en la zona, con una variación de nivel promedio de 2.37 metros (3.41 metros en mareas vivas y 1.34 metros en mareas muertas), indican un comportamiento estuárico mesomareal de la Bahía. Las intensidades de corriente de marea registradas indican una velocidad máxima de 1.84 m/s. Dicho valor, debido a la limitación de las mediciones existentes, no es suficiente para caracterizar de manera absoluta el estuario, pero sí como orden de magnitud.

Por último, resaltar que los resultados expresados en esta contribución son originales y, aunque no permiten describir con exactitud el comportamiento real de la bahía (los datos disponibles sólo cubren unas semanas durante la época seca), suponen un primer paso para estudios futuros complementarios y el establecimiento de estrategias de gestión costera.

## ABSTRACT

Inhambane Bay, on the southern coast of Mozambique, is a hitherto unexplored area, so no proven hydrodynamic study is known. In this context, the present work aims to carry out an oceanographic characterization of the estuary, based on the data resulting from an "in situ" campaign, in which I personally participated and which took place during the summer of 2017.

Through the treatment of CTD measurements and the analysis of trajectories made by drifting buoys, this work presents a study of the temperature, salinity and density distributions within the bay; the estimation of water renewal using tidal prisms; the characterization of the tidal currents present in the area and the obtaining of daily behaviour patterns. Finally, through the analysis of the results obtained, the behaviour and type of estuary under study is described.

Inhambane Bay is a well-mixed estuary, with no significant stratification, and with a lateral hourly circulation that allows the body of water to be renewed approximately every 40 days. The most relevant hydrodynamic variables present homogeneous verticality profiles, with ranges between 21 and 24.5 °C of temperature; 26 and 36 PSU of salinity; and between 17 and 25 kg/m<sup>3</sup> of density. The latter is totally influenced by salinity, with similar profiles.

There is a slight zoning within the Bay, marked by the existing hydrodynamic currents and characteristics, dividing it into *the Lateral Channel*, *the Estuary of Morrumbene*, *the Central Channel* and *the Ilha's Channel*. This partition allows us to qualify the influence of fresh water, which is practically restricted at the beginning of the Bay, where the contribution of water from inland rivers is greater.

The existing tides in the area, with an average level variation of 2.37 meters (3.41 meters in live tides and 1.34 meters in dead tides), indicate a mesomareal estuarine behavior of the Bay. The tidal current intensities recorded indicate a maximum speed of 1.84 m/s. This value, due to the limitation of the existing measurements, is not sufficient to characterize the estuary in an absolute way, but it is sufficient as an order of magnitude.

Finally, it should be noted that the results expressed in this contribution are original and, although they do not make it possible to describe exactly the actual behaviour of the bay (the data available only cover a few weeks during the dry season), they are a first step towards complementary future studies and the establishment of coastal management strategies.

## Tabla de Contenidos

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN .....   | 2  |
| ABSTRACT .....  | 3  |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                   | 9  |
| 1.1. Descripción inicial de la Bahía de Inhambane ..... | 9  |
| 1.2. Contextualización del presente trabajo .....       | 11 |
| 1.3. Contenidos de la contribución .....                | 11 |
| 2. ESTADO DEL ARTE .....                                | 12 |
| 2.1. Dinámica de estuarios .....                        | 12 |
| 2.2. Zona de estudio .....                              | 17 |
| 3. OBJETIVOS .....                                      | 22 |
| 4. METODOLOGÍA .....                                    | 23 |
| 4.1. Descripción de los equipos de medición .....       | 23 |
| - Boyas lagrangianas .....                              | 23 |
| - Sonda CTD .....                                       | 24 |
| - Mareógrafos .....                                     | 25 |
| 4.2. Campaña CTD .....                                  | 26 |
| 4.3. Campaña de boyas lagrangianas .....                | 29 |
| 4.4. Ocean Data View (ODV) .....                        | 31 |
| 4.5. Depuración de datos CTD .....                      | 32 |
| 4.6. Tratamiento de datos de boyas lagrangianas .....   | 33 |
| 5. RESULTADOS .....                                     | 34 |
| 5.1. Perfiles de las mediciones CTD .....               | 34 |
| 5.1.1. Perfiles de temperatura .....                    | 35 |
| 5.1.2. Perfiles de salinidad .....                      | 36 |
| 5.1.3. Perfiles de densidad y diagrama T-S .....        | 37 |
| 5.2. Secciones de las mediciones CTD .....              | 38 |
| 5.2.1. Secciones de superficie .....                    | 38 |
| 5.2.2. Secciones verticales .....                       | 43 |
| 5.3. Variabilidad temporal .....                        | 49 |
| 5.3.1. Punto de referencia .....                        | 49 |
| 5.3.2. Otros puntos fijos .....                         | 50 |
| 5.3.3. Variaciones de nivel de marea .....              | 53 |
| 5.4. Prisma de marea .....                              | 54 |
| 5.4.1. Tiempo de permanencia .....                      | 55 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.5. | Resultados de las trayectorias de las boyas lagrangianas.....  | 56 |
| 6.   | DISCUSIÓN.....   | 65 |
| 6.1. | Tipo de estuario.....  | 65 |
| 6.2. | Caracterización de la Bahía de Inhambane .....                 | 66 |
| 6.3. | Corrientes de marea.....                                       | 67 |
| 7.   | CONCLUSIONES .....   | 68 |
| 8.   | ANEJOS .....   | 70 |
| A.   | Resultados por transectos (perfiles CTD) .....                 | 70 |
| B.   | Comparativa de mediciones CTD con posición fija .....          | 74 |
| C.   | Profundidades máximas registradas por las mediciones CTD ..... | 80 |
| 9.   | BIBLIOGRAFÍA .....   | 81 |
| 10.  | WEBGRAFÍA .....  | 82 |

## Listado de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de localización de Inhambane, Mozambique (Fuente: Google Earth).....   | 9  |
| Figura 2. Bahía de Inhambane, zona objeto de estudio (Fuente: Google Earth).....  | 10 |
| Figura 3. Principales localizaciones de la Bahía de Inhambane. Zoom: Estuario de Morrumbene y sus principales aportaciones de agua dulce. ....  | 12 |
| Figura 4. Estuario de Cuña Salina. ....   | 13 |
| Figura 5. Estuario Parcialmente Mezclado.....   | 14 |
| Figura 6. Estuario Totalmente Mezclado. ....  | 14 |
| Figura 7. Registro de las mareas existentes durante las jornadas de campaña (Tabela de mares de Inhambane). ....  | 15 |
| Figura 8. Tabla climática de Inhambane (climate-data.org). ....   | 17 |
| Figura 9. Patrón de circulación del Canal de Mozambique (Sætre & Silva, 1982). ....   | 18 |
| Figura 10. Parámetros que caracterizaron las aguas superficiales en períodos de tres meses para los cruceros realizados entre 1977 y 1980 (Cândida S., Ruby J. & Dove V., 2002). .... | 18 |
| Figura 11. Distribución horizontal típica de la salinidad superficial a lo largo de la costa, mayo - junio de 1979 (Cândida S., Ruby J. & Dove V., 2002). ....                        | 19 |
| Figura 12. Canales principales de la Bahía de Inhambane. ....   | 20 |
| Figura 13. Zonas relevantes de la Bahía de Inhambane.....   | 20 |
| Figura 14. Distancias características de la Bahía de Inhambane.....   | 21 |
| Figura 15. Boya lagrangiana o de deriva usada durante la campaña. ....  | 24 |
| Figura 16. Sonda CTD usada durante la campaña.....  | 24 |
| Figura 17. Mareógrafo acústico usado durante la campaña. ....   | 25 |
| Figura 18. Mareógrafo de presión usado durante la campaña.....  | 25 |
| Figura 19. Representación de la densidad en función de la temperatura y la salinidad mediante la ecuación de estado de la UNESCO (1980). ....   | 26 |
| Figura 20. Situación de los diferentes transectos empleados en las campañas CTD.....  | 28 |
| Figura 21. Puntos de inicio de las trayectorias de las boyas lagrangianas.....  | 30 |
| Figura 22. Ejemplo de archivo de los datos registrados por una boya lagrangiana.....  | 33 |
| Figura 23. A) Perfiles de temperatura y temperatura media de todas las mediciones CTD. B) Perfiles de temperatura jornadas de campaña.....  | 35 |
| Figura 24. Situación del punto de máxima profundidad C8, coloreado en rojo. ....  | 36 |
| Figura 25. A) Perfiles de salinidad y salinidad media de todas las mediciones CTD. B) Perfiles de salinidad media por jornadas de campaña. ....                                       | 36 |
| Figura 26. A) Perfiles de densidad y densidad media de todas las mediciones CTD. B) Perfiles de densidad media por jornadas de campaña.....   | 37 |
| Figura 27. Gráfico de dispersión T-S de todas las mediciones CTD.....   | 38 |
| Figura 28. A) Temperatura en la superficie. B) Temperatura a 3m de profundidad. C) Temperatura a 5m de profundidad.....   | 39 |
| Figura 29. A) Salinidad en la superficie. B) Salinidad a 3m de profundidad. C) Salinidad a 5m de profundidad.....   | 41 |
| Figura 30. A) Densidad en la superficie. B) Densidad a 3m de profundidad. C) Densidad a 5m de profundidad.....  | 42 |
| Figura 31. Secciones verticales Canal Lateral: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad. ....  | 44 |
| Figura 32. Secciones verticales Canal Central: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad. ....  | 45 |
| Figura 33. Secciones verticales Morrumbene: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad. ....   | 46 |
| Figura 34. Secciones verticales Canal da Ilha: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad. ....  | 47 |
| Figura 35. Posición del punto de referencia (R) en el pantalán. ....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 36. Perfiles del punto de referencia (R). .....             | 49 |
| Figura 37. Perfiles de la estación fija C0.....                    | 51 |
| Figura 38. Perfiles de la estación fija C8.....                    | 52 |
| Figura 39. Trayectoria boyas lagrangianas día 19/07. ....          | 56 |
| Figura 40. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.19..... | 57 |
| Figura 41. Trayectoria boyas lagrangianas día 20/07. ....          | 57 |
| Figura 42. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.20..... | 58 |
| Figura 43. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B2.20..... | 58 |
| Figura 44. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B3.20..... | 59 |
| Figura 45. Trayectoria boyas lagrangianas día 21/07. ....          | 59 |
| Figura 46. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.21..... | 60 |
| Figura 47. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B2.21..... | 60 |
| Figura 48. Trayectoria boyas lagrangianas día 25/07. ....          | 61 |
| Figura 49. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.25..... | 61 |
| Figura 50. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B2.25..... | 62 |
| Figura 51. Trayectoria boyas lagrangianas día 26/07. ....          | 62 |
| Figura 52. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.26..... | 63 |
| Figura 53. Perfiles CTD del Canal Central. ....                    | 70 |
| Figura 54. Perfiles CTD del Canal Lateral.....                     | 71 |
| Figura 55. Perfiles CTD de Morrumbene.....                         | 72 |
| Figura 56. Perfiles CTD del Canal da Ilha. ....                    | 73 |
| Figura 57. Perfiles de la estación fija H1. ....                   | 74 |
| Figura 58. Perfiles de la estación fija H5. ....                   | 75 |
| Figura 59. Perfiles de la estación fija H6. ....                   | 76 |
| Figura 60. Perfiles de la estación fija M5. ....                   | 77 |
| Figura 61. Perfiles de la estación fija M6. ....                   | 78 |
| Figura 62. Perfiles de la estación fija M7. ....                   | 79 |



## Listado de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Transectos CTD. ....  | 27 |
| Tabla 2. Duración y tipo de marea en las trayectorias de las boyas lagrangianas..... | 30 |
| Tabla 3. Datos de los perfiles de la estación fija de referencia (R). ....           | 50 |
| Tabla 4. Datos de los perfiles de la estación fija C0. ....                          | 51 |
| Tabla 5. Datos de los perfiles de la estación fija C8. ....                          | 52 |
| Tabla 6. Variaciones del nivel de marea.....   | 53 |
| Tabla 7. Variaciones de nivel de marea teórica, experimental y medias.....           | 54 |
| Tabla 8. Datos para el cálculo del prisma de marea. ....                             | 55 |
| Tabla 9. Resultados del prisma de marea. ....  | 55 |
| Tabla 10. Trayectorias de las boyas lagrangianas. ....                               | 56 |
| Tabla 11. Resultados de las trayectorias de las boyas lagrangianas. ....             | 63 |
| Tabla 12. Resumen de velocidades, media y máxima, de corriente de marea.....         | 64 |
| Tabla 13. Datos de los perfiles de la estación fija H1.....                          | 74 |
| Tabla 14. Datos de los perfiles de la estación fija H5.....                          | 75 |
| Tabla 15. Datos de los perfiles de la estación fija H6.....                          | 76 |
| Tabla 16. Datos de los perfiles de la estación fija M5.....                          | 77 |
| Tabla 17. Datos de los perfiles de la estación fija M6.....                          | 78 |
| Tabla 18. Datos de los perfiles de la estación fija M7.....                          | 79 |
| Tabla 19. Profundidades máximas de todas las mediciones CTD. ....                    | 80 |

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción inicial de la Bahía de Inhambane

La Bahía de Inhambane, provincia de Inhambane, se encuentra en la costa sur de Mozambique, a unos 470 km al noreste de Maputo, capital del país. Sus coordenadas de latitud y longitud son 23°00'S; 34°30'E respectivamente.



Figura 1. Mapa de localización de Inhambane, Mozambique (Fuente: Google Earth).

Mozambique sigue el patrón de mayor densidad de población cerca de la costa. Se estima que en 2007 el 44% de la población vivía en distritos costeros. La alta presión antropogénica en las áreas costeras es el resultado de la concentración de actividades económicas, convirtiéndose en los núcleos de desarrollo. Con la alta tasa de crecimiento de la población de 2.7% por año que el país está experimentando (INE, 2015), se espera que la presión continúe aumentando a lo largo de la costa. Esta concentración de la población y las actividades económicas reflejan e inducen el desarrollo de diferentes infraestructuras costeras con potencial para cambiar el patrón de sedimentos transporte y acumulación. También aumenta la demanda de nuevas protecciones costeras e intervenciones para defender las infraestructuras contra la erosión y la inundación (Palalane J., 2016).



Figura 2. Bahía de Inhambane, zona objeto de estudio (Fuente: Google Earth).

El problema principal de la zona radica en la poca información conocida, que si cabe es más escasa en el ámbito científico. Así, se ha utilizado una aproximación de las distancias medias de la bahía para conocer el área total, que podemos resumir en unos 340 km<sup>2</sup>.

En cuanto al origen geológico, se ha podido observar la existencia de arenas en la formación de la bahía, lo que da lugar a las barras características de la zona (*bar-built estuary*). Por otro lado, el fondo de la misma está formado por fangos, provenientes de los ríos y canales que desembocan en ella.

La profundidad máxima del estuario o bahía depende de la zona en la que nos encontremos y el tipo de marea en el momento de la medición. El mayor valor es de 17.69 m, obtenido en el *Canal Central*.

Desde algo, en principio, tan trivial como puede ser el conocimiento de la variación de las mareas o la calidad del agua presente, hasta el estudio de la morfodinámica de la zona, son datos relevantes para la futura gestión de los recursos presentes en la bahía y sus alrededores. Por otro lado, el hecho de que sea una zona no explotada, le da infinidad de posibilidades de uso en un futuro cercano: establecer estrategias para mitigar el cambio climático, planes de saneamiento, gestión litoral, asentamiento de una central de energía mareomotriz, sistemas de aviso para prevenciones, planning de inundaciones...

## 1.2. Contextualización del presente trabajo

En primer lugar, cabe destacar que la Bahía de Inhambane es una zona inexplorada hasta ahora, por lo que no se conoce ningún estudio hidrodinámico contrastado.

En este sentido, en Julio de 2017 se llevó a cabo el proyecto de cooperación, del que pude formar parte, apoyado por el CCD (Centre de Cooperación para el Desarrollo) de la UPC: *“Apoyo a las acciones iniciales para la consolidación de los estudios de Ingeniería Civil en la UP-Maxixe (Mozambique): desarrollo de un grupo de investigación en el ámbito de la Ingeniería Marítima”* (Código 2017-U001). Dicho proyecto se contextualiza en la colaboración interuniversitaria entre la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) - BarcelonaTech. y la Universidad Pedagógica Maxixe (UP - Maxixe), una cooperación basada en el desarrollo y el apoyo de las capacidades docentes de la contraparte, así como en el lanzamiento de líneas de investigación en el campo de la Ingeniería Civil. Las tareas objeto de este proyecto se centraron en la adquisición de datos en la bahía de Inhambane (salinidad, temperatura, corrientes...), con el propósito de avanzar en el conocimiento de la hidrodinámica de la región, y la instalación de instrumentación *“low cost & do it yourself”* asequible a la población local.

El objetivo de la campaña nombrada no ha sido sólo la toma de datos y su procesado, que será el tema principal del trabajo. El hecho de fabricar *in situ* el equipamiento necesario en un país en vías de desarrollo como Mozambique, permite la continuidad del proyecto en otras campañas y la contribución al desarrollo técnico y científico de la población.

Por otra parte, el hecho de que sea un área nueva de estudio, hace que la mayoría de los datos y su posterior análisis no puedan compararse con otros similares o de otras contribuciones. Así, los resultados expresados en esta contribución son originales y, aunque no podrán describir con exactitud el comportamiento real de la bahía (los datos disponibles obtenidos sólo cubren unas pocas semanas del año), suponen un primer paso para estudios futuros complementarios y con mayor rango de alcance en la toma de medidas.

Conocida la situación actual, en este trabajo se pretende realizar una caracterización oceanográfica de la Bahía de Inhambane, apoyándose principalmente en la campaña realizada en Mozambique durante el verano de 2017. En ella se recogieron datos principalmente a partir de dos equipos de medidas: una sonda CTD (Conductividad, Temperatura, Profundidad) y boyas lagrangianas (fabricadas *“in situ”*) que permitirán describir el comportamiento del estuario objeto de estudio.

## 1.3. Contenidos de la contribución

La estructura del presente trabajo está organizada como se describe a continuación:

Un primer bloque de contenidos donde se ha incluido esta introducción, se presentarán los objetivos y el estado del arte de la zona de estudio. El siguiente apartado consistirá en la metodología adoptada; donde se describirán los equipos utilizados, las campañas de campo (Julio 2017) y el programa ODV (*“Ocean Data View”*) usado en el procesado de datos.

A continuación se presentará el bloque de resultados, divididos en diferentes zonas de la bahía, y su discusión. Finalmente, se concluirá el trabajo con el apartado de las conclusiones y la bibliografía. Como material de apoyo se incluyen diferentes anejos al final del documento.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Dinámica de estuarios

Un estuario se puede definir como un dominio de agua costero semiconfinado, que tiene una conexión libre con el mar y donde el agua de mar se diluye con el agua dulce proveniente del desagüe continental (Cameron y Pritchard 1963).

La Bahía de Inhambane no es una desembocadura propiamente dicha, puesto que el río *Mutamba* que finaliza en ella posee un caudal pequeño y su finalización se encuentra muy alejada del mar abierto. A pesar de esto, al tener aportaciones de agua dulce del propio *Mutamba*, otros pequeños ríos de los alrededores (en su mayoría provenientes de la zona de *Morrumbene*) y las aportaciones de agua salada directamente del mar, presenta un comportamiento estuárico.

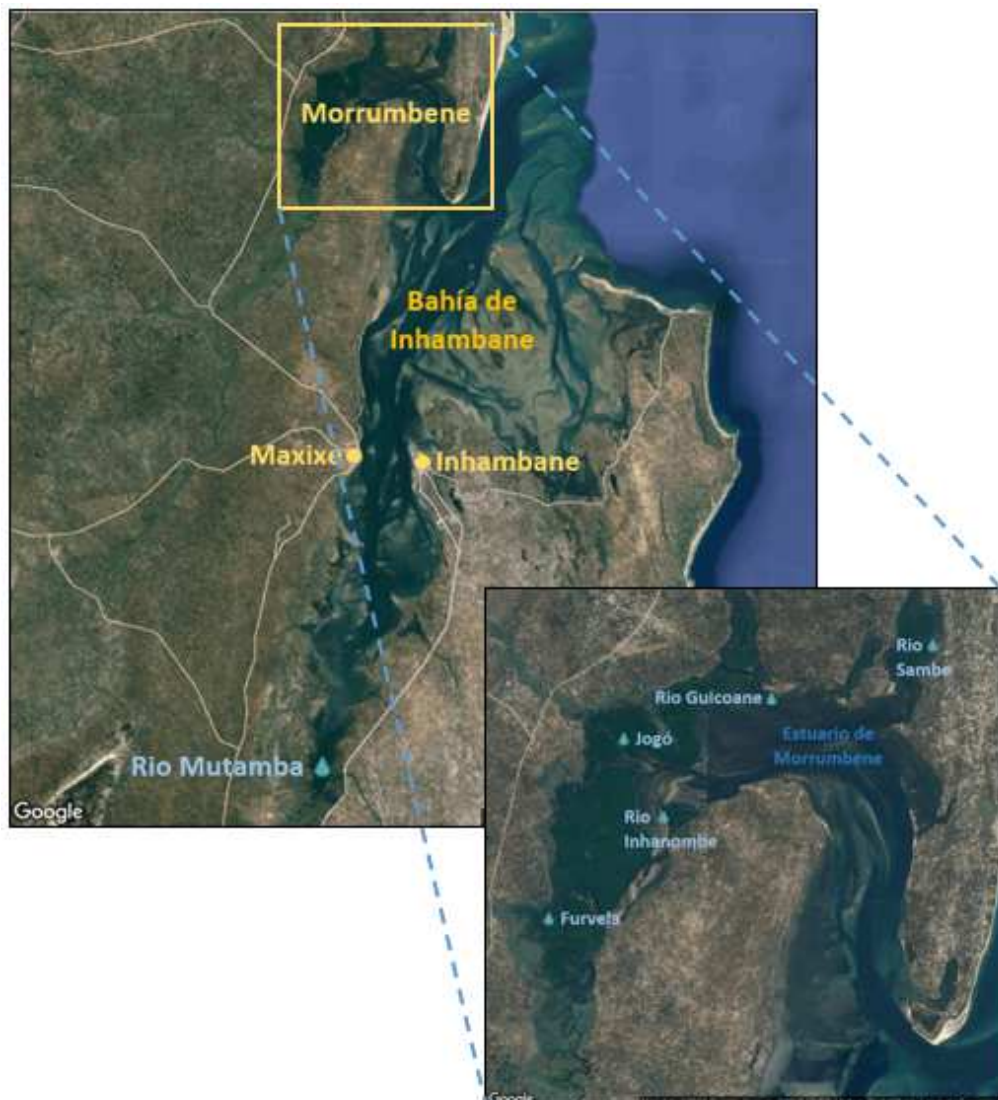


Figura 3. Principales localizaciones de la Bahía de Inhambane. Zoom: Estuario de Morrumbene y sus principales aportaciones de agua dulce.



Así, en este caso concreto nos encontramos con una bahía formada por dos estuarios claramente diferenciados, resultado de los dos ríos principales que desembocan en ella; el río *Mutamba* al sur (Figura 3), y el *Inhanombe*, al noroeste de la bahía, procedente de la zona de *Morrumbene* (Zoom en la Figura 3).

Existen tres causas fundamentales que generan los movimientos de masas de agua en un estuario: la marea, el viento y las olas que generan, y las diferencias de densidad (Hearn 1995 y Friedrichs 2002a). Las corrientes mareales son producidas por la oscilación de la altura de la columna de agua debido a la marea astronómica (atracción de los astros) y de la marea meteorológica (presión atmosférica y vientos). Las corrientes del viento son generadas por éste al soplar de manera constante durante un cierto tiempo sobre una superficie de agua. El viento actúa como una fuerza externa, que genera unas tensiones superficiales que arrastran las capas superficiales del agua, creando las corrientes. Y finalmente, las corrientes generadas por las diferencias de densidad son creadas por diferencias de presión debido a gradientes de densidad entre el agua dulce que entra y el agua salada existente (Officer 1983). Como el agua menos densa fluye por encima del agua más densa hacia mar abierto, la turbulencia en el agua de la interfase causa que las dos capas se mezclen parcialmente y por tanto que se reduzca la diferencia de densidad entre ambas (Rattray y Hansen 1962, Hansen y Rattray 1965).

La aportación de agua dulce es el principal proceso que afecta a la circulación estuárica a largo plazo (Valle-Levinson 2010). Ocasionalmente, la temperatura puede convertirse en un factor dominante cuando el calor superficial proporciona una diferencia de densidad suficiente para mantener una circulación gravitacional (i.e. Cheng et al. 2010).

Los estuarios pueden ser clasificados de múltiples maneras según el criterio utilizado. La clasificación más conocida y usada es la de la estructura vertical de salinidad (Pritchard, 1952; Cameron y Pritchard, 1963). En esta, el grado de mezcla entre dos capas de agua (dulce y salada) dentro del estuario define la estructura salina y toma un papel importante en el intercambio de agua y su circulación. Según esta clasificación los estuarios se pueden clasificar como:

- a) **Cuña salina:** Se produce con mareas pequeñas y caudales importantes. El agua dulce circula por encima del agua del mar y casi no se mezcla, ya que el coeficiente de turbulencia vertical es mínimo. Por lo tanto, existe una pycnoclina aguda, ya que se producen fuertes gradientes de densidad.

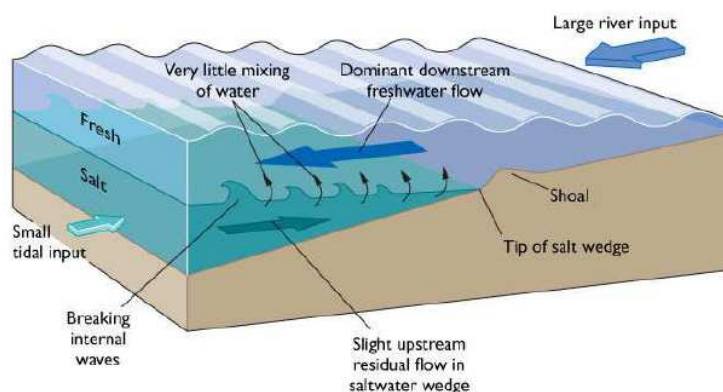


Figura 4. Estuario de Cuña Salina.

- b) Estuario parcialmente mezclado: Se produce en zonas de mareas importantes. Se produce una mezcla del agua y aparecen gradientes de salinidad.

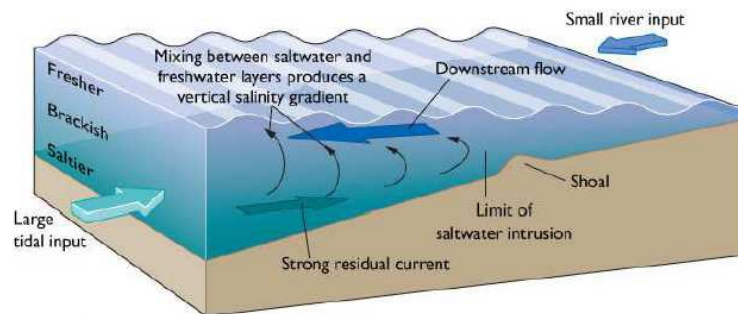


Figura 5. Estuario Parcialmente Mezclado.

La circulación de un estuario, es decir, cómo se mueve el agua dentro de este, puede ser positiva o negativa (Pritchard 1952). Esto permite la renovación del agua dentro del estuario. Será positiva cuando el agua marina penetra por debajo del agua dulce y esta, al ser menos densa, circula por encima del agua del mar saliendo por la capa superficial de nuevo hacia el mar. Por el contrario, cuando es el agua marina la que circula por la superficie del agua, hablaremos de circulación negativa.

- c) Estuario totalmente mezclado: Tienen lugar en zonas de mareas importantes y estuarios muy anchos, donde se manifiesta el efecto Coriolis. Las diferencias verticales de salinidad son muy pequeñas ya que se produce una mezcla importante entre ambas capas.

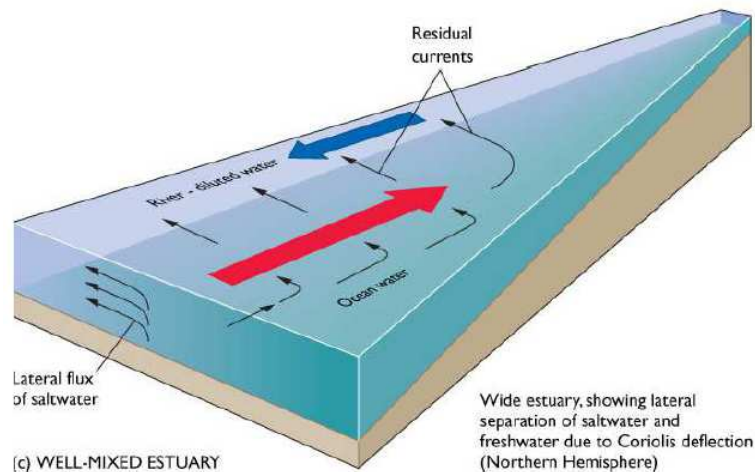


Figura 6. Estuario Totalmente Mezclado.

En nuestro caso, si el estuario resultara ser totalmente mezclado, la circulación lateral resultante de las corrientes residuales sería en el sentido contrario al de la figura anterior. Este hecho se debe a que dichas corrientes residuales se separan en función del hemisferio, y nuestra zona de estudio se encuentra en el hemisferio sur. Así, encontraríamos una circulación lateral en sentido horario.

Otra de las posibles clasificaciones de un estuario reside en el rango de marea que posee (Davies 1964).

- Micromareales <2m.
- Mesomareales <4m, >2m.
- Macromareales <6m, >4m.
- Hipermareales >6m.

Dicha clasificación, aunque menos común, se ha considerado importante en el presente estudio debido a la importancia de las mareas experimentadas en la Bahía, que han sido previamente consultadas en la “*Tabela de mares de Inhambane*”; un documento que caracteriza y contiene el rango de mareas de todo el año, divididas por meses, días y horas. La caracterización armónica de dichas mareas se realizó a través de un mareógrafo posicionado en la zona, en el año 1995.

| HORAS DO FUSO + 2 (TU +2) PORTO DE INHAMBANE ANO 2017 |      |        |     |        |        |      |      |          |     |      |        |
|---|------|--------|-----|--------|--------|------|------|----------|-----|------|--------|
| JULHO   |      |        |     | AGOSTO |        |      |      | SETEMBRO |     |      |        |
| Dia   | Hora | Altura | Dia | Hora   | Altura | Dia  | Hora | Altura   | Dia | Hora | Altura |
| h:mm  | m    | h:mm   | m   | h:mm   | m      | h:mm | m    | h:mm     | m   | h:mm | m      |
| 1   | 0400 | 1.12   | 16  | 0258   | 1.03   | 1    | 0516 | 1.31     | 16  | 0500 | 1.38   |
| 2   | 0543 | 2.57   | 17  | 0411   | 1.20   | 2    | 0619 | 2.31     | 17  | 0641 | 1.36   |
| 3   | 0531 | 1.10   | 18  | 0503   | 2.59   | 3    | 0633 | 1.31     | 18  | 0802 | 1.21   |
| 4   | 2228 | 2.54   | 19  | 0500   | 2.47   | 4    | 0746 | 1.21     | 19  | 0802 | 1.21   |
| 5   | 0502 | 1.22   | 20  | 0505   | 2.58   | 5    | 0847 | 1.06     | 20  | 0906 | 0.99   |
| 6   | 1053 | 2.44   | 21  | 0518   | 1.06   | 6    | 0947 | 1.06     | 21  | 0906 | 0.99   |
| 7   | 1737 | 1.17   | 22  | 0518   | 1.06   | 7    | 1049 | 0.64     | 22  | 1049 | 0.64   |
| 8   | 2359 | 2.45   | 23  | 0518   | 1.06   | 8    | 1149 | 0.64     | 23  | 1149 | 0.64   |
| 9   | 0610 | 1.22   | 24  | 0518   | 1.06   | 9    | 1249 | 0.64     | 24  | 1249 | 0.64   |
| 10  | 1235 | 2.42   | 25  | 0518   | 1.06   | 10   | 1349 | 0.64     | 25  | 1349 | 0.64   |
| 11  | 1847 | 1.14   | 26  | 0518   | 1.06   | 11   | 1449 | 0.64     | 26  | 1449 | 0.64   |
| 12  | 0125 | 2.50   | 27  | 0518   | 1.06   | 12   | 1549 | 0.64     | 27  | 1549 | 0.64   |
| 13  | 0717 | 1.13   | 28  | 0518   | 1.06   | 13   | 1649 | 0.64     | 28  | 1649 | 0.64   |
| 14  | 1349 | 2.53   | 29  | 0518   | 1.06   | 14   | 1749 | 0.64     | 29  | 1749 | 0.64   |
| 15  | 1953 | 1.05   | 30  | 0518   | 1.06   | 15   | 1849 | 0.64     | 30  | 1849 | 0.64   |
| 16  | 0226 | 2.63   | 31  | 0518   | 1.06   | 16   | 1949 | 0.64     | 31  | 1949 | 0.64   |
| 17  | 0818 | 0.99   |     |        |        | 17   | 2049 | 0.64     |     |      |        |
| 18  | 1448 | 2.67   |     |        |        | 18   | 2149 | 0.64     |     |      |        |
| 19  | 2050 | 0.92   |     |        |        | 19   | 2249 | 0.64     |     |      |        |
| 20  | 0314 | 2.70   |     |        |        | 20   | 2349 | 0.64     |     |      |        |
| 21  | 0913 | 0.96   |     |        |        | 21   | 0049 | 0.64     |     |      |        |
| 22  | 1533 | 2.79   |     |        |        | 22   | 0149 | 0.64     |     |      |        |
| 23  | 2137 | 0.92   |     |        |        | 23   | 0249 | 0.64     |     |      |        |
| 24  | 0313 | 2.78   |     |        |        | 24   | 0349 | 0.64     |     |      |        |
| 25  | 0913 | 0.96   |     |        |        | 25   | 0449 | 0.64     |     |      |        |
| 26  | 1533 | 2.79   |     |        |        | 26   | 0549 | 0.64     |     |      |        |
| 27  | 2137 | 0.92   |     |        |        | 27   | 0649 | 0.64     |     |      |        |
| 28  | 0313 | 2.78   |     |        |        | 28   | 0749 | 0.64     |     |      |        |
| 29  | 0913 | 0.96   |     |        |        | 29   | 0849 | 0.64     |     |      |        |
| 30  | 1533 | 2.79   |     |        |        | 30   | 0949 | 0.64     |     |      |        |
| 31  | 2137 | 0.92   |     |        |        | 31   | 1049 | 0.64     |     |      |        |

Figura 7. Registro de las mareas existentes durante las jornadas de campaña (Tabela de mares de Inhambane).



Las mareas se entienden como el ascenso y descenso del nivel del mar que resulta de la atracción gravitacional de la Luna y del Sol que ejercen una acción sobre nuestro planeta. Según Bastidas (2007), aunque el movimiento horizontal del agua resulta de la misma causa, es preferible designar a éste como corriente de marea, reservando el nombre de marea para el movimiento vertical ascendente y descendente del fenómeno. En estos movimientos el mar invade las costas (Pleamar o flujo) y se retira de ellas (bajamar o Reflujo) dos veces cada día. Los estuarios con mareas de alto rango tienen un gran volumen de agua entre pleamar y bajamar. Por otro lado, la interacción entre la propagación de la marea en el estuario y la morfología conllevan a variaciones en el rango de la de la primera y en la fuerza de las corrientes.

Sumado a este ciclo de pleamar y bajamar, dependiendo de la fase de la luna encontramos dos posibles situaciones en las que la actividad de la marea es más o menos intensa. Durante la luna nueva o llena, la actividad mareal aumenta, produciéndose las mareas vivas. En ellas la amplitud de onda es la máxima posible: el rango de variación de nivel de mar entre la pleamar y la bajamar es máximo. Por otro lado, cuando la luna está en fase creciente o menguante, encontramos la situación opuesta. Decrece la intensidad y la amplitud de onda es mínimo, reduciendo el rango de variación de nivel de marea. Estas segundas se denominan mareas muertas.

Las corrientes de marea, que se analizarán en el presente trabajo, tienen un efecto despreciable en el océano abierto, pero en zonas cercanas a la costa o en canales son de gran intensidad. La batimetría local de la costa afecta de manera considerable ya que la masa de agua en movimiento se ve desviada y afectada por los accidentes orográficos submarinos. Al ser producto directo de las mareas, este tipo de corrientes presentan una periodicidad y sentido marcados, donde la dirección y la velocidad varían dependiendo el momento del día en el que nos encontremos.

En estuarios, como el objeto del presente estudio, donde la dirección de la corriente es restringida a pasar por determinados canales, la corriente de marea fluye alternativamente en direcciones opuestas. Durante cada cambio de dirección de la corriente existe un instante o un corto período de tiempo en el que no hay o casi no hay desplazamiento de agua, llamado calma o *slack water*. Durante el flujo en cada una de las direcciones, la velocidad varía de cero en el momento de calma a su máximo, obteniendo la intensidad o velocidad máxima de la corriente alrededor de la mitad del período entre las dos calmas (Martínez de Osés 2006).

## 2.2. Zona de estudio

El área de estudio de este trabajo es la Bahía de Inhambane, al sur del país mozambicano, que cuenta con un área aproximada de 340 km<sup>2</sup>, que se adentra en la costa con forma aproximadamente triangular. Esta geomorfología es típica de la costa de Mozambique, donde los estuarios son formados por la influencia del transporte de sedimentos debido al oleaje, que es predominante desde el cuadrante sureste del Océano Índico y los procesos derivados del viento (Palalane J., 2016). Añadido a estos, aparecen las corrientes longitudinales paralelas a su costa y las fuertes mareas de la zona.

Inhambane tiene un clima tropical, con mucha más pluviosidad en el verano que en el invierno, dividiendo el año en estación húmeda y estación seca. La pluviosidad media anual de 939 mm, con una variación de 119 mm entre el mes más seco (agosto) y el más lluvioso (enero). Por otro lado, la temperatura media es de 24 °C, con una variación de 6.7 °C durante el año (climate-data.org). Esta poca variabilidad de la temperatura entre verano e invierno hace que, a pesar de que nuestro estudio se basa en datos obtenidos durante verano o época seca, pueda ser extrapolable al resto del año (teniendo en cuenta que se pueden dar pequeñas variaciones).

|                         | enero | febrero | marzo | abril | mayo | junio | julio | agosto | septiembre | octubre | noviembre | diciembre |
|-------------------------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| Temperatura media (°C)  | 27.1  | 26.9    | 26.4  | 24.9  | 22.7 | 20.8  | 20.4  | 20.9   | 22.3       | 24      | 25.2      | 26.3      |
| Temperatura mínima (°C) | 22.7  | 22.4    | 22    | 20.1  | 17.7 | 15.7  | 15.4  | 15.9   | 17.4       | 19.3    | 20.9      | 21.6      |
| Temperatura máxima (°C) | 31.5  | 31.5    | 30.9  | 29.8  | 27.8 | 25.9  | 25.4  | 25.9   | 27.2       | 28.8    | 29.5      | 31        |
| Temperatura media (°F)  | 80.8  | 80.4    | 79.5  | 76.8  | 72.9 | 69.4  | 68.7  | 69.6   | 72.1       | 75.2    | 77.4      | 79.3      |
| Temperatura mínima (°F) | 72.9  | 72.3    | 71.6  | 68.2  | 63.9 | 60.3  | 59.7  | 60.6   | 63.3       | 66.7    | 69.6      | 70.9      |
| Temperatura máxima (°F) | 88.7  | 88.7    | 87.6  | 85.6  | 82.0 | 78.6  | 77.7  | 78.6   | 81.0       | 83.8    | 85.1      | 87.8      |
| Lluvia (mm)             | 148   | 134     | 115   | 72    | 57   | 55    | 35    | 29     | 31         | 37      | 80        | 146       |

Figura 8. Tabla climática de Inhambane (climate-data.org).

Las mareas en las aguas marinas de Mozambique se comportan como una onda estacionaria, es decir, la corriente de mareas cambia de sentido en la marea llena y en la marea baja y las mayores velocidades se observan en los períodos intermedios. Las mareas son semi-diurnas con desigualdad diurna bastante significativa. Las alturas de marea en la zona sur del país son de unos 3 m, que se amplifican por el efecto Kilven en el canal de Mozambique (Hoguane, 1999).

Existe un patrón de circulación de las aguas oceánicas a lo largo de la costa mozambicana (Sætre & Silva, 1982) que se caracteriza por tres células anticiclónicas, que varían su posición a lo largo del año, y por pequeños vórtices cíclicos, uno de los cuales se encuentra en la zona de Inhambane, entre los grandes anticiclones. Además, junto a la costa existe una corriente con dirección norte, producto de los vórtices ciclónicos y/o de los vientos (Steen y Hoguane, 1990).

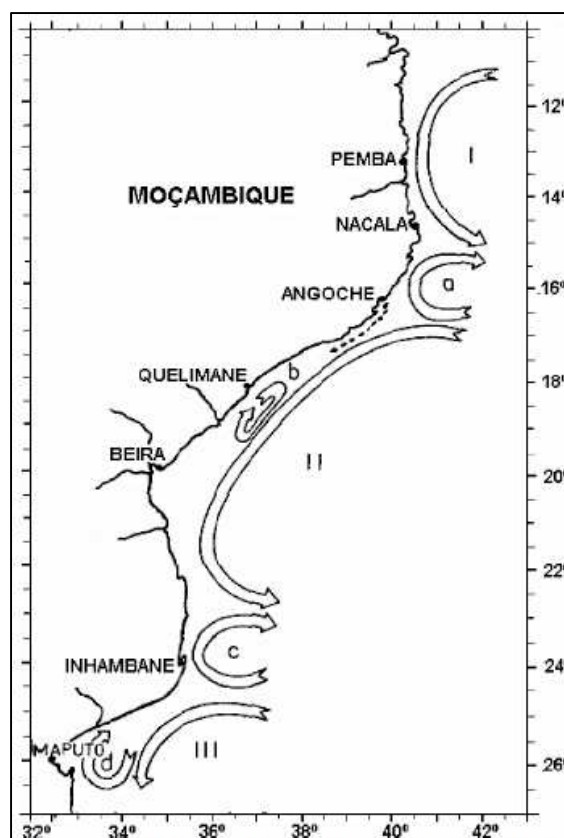


Figura 9. Patrón de circulación del Canal de Mozambique (Sætre & Silva, 1982).

Sin embargo, no existen registros de salinidades y temperaturas en las aguas de la Bahía de Inhambane, pero basándonos en el artículo de Cândida S. (2002), podemos prever un rango de valores similares a los del Canal de Madagascar, la zona más próxima con datos a nuestro estuario objeto de estudio. Allí, según el estudio, las salinidades varían desde los 34.4 y los 35.4 PSU; y las temperaturas superficiales desde los 26 hasta los 30°C, lo que nos da una idea inicial de la poca variación estacional existente. Estos valores podemos observarlos en la siguiente tabla, extraída de la misma publicación, y donde la zona de Inhambane corresponde al área D.

| Feature                             | Period      | Area      |           |           |           |           |
|-------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                     |             | A         | B         | C         | D         | E         |
| Surface Temperature (t° C)          | Jan-Feb-Mar | 28-31     | 26-30     | 27-30     | 26-30     | 26-29     |
|                                     | Apr-May-Jun | 27-30     | 27-29     | 26-28     | 25-27     | 24-25     |
|                                     | Jul-Aug-Sep | 26-27     | 24-26     | 24-25     | 21-25     | 22-25     |
|                                     | Oct-Nov-Dec | 27-29     | 26-28     | 27-28     | 26-28     | 25-27     |
| Surface Salinity (S ‰)              | Jan-Feb-Mar | 34.3-35.2 | 34.5-35.0 | 34.4-35.3 | 34.4-35.2 | 34.4-35.2 |
|                                     | Apr-May-Jun | 34.7-35.1 | 34.5-35.1 | 34.0-35.3 | 34.5-35.5 | 35.0-35.5 |
|                                     | Jul-Aug-Sep | 35.0-35.3 | 34.5-35.2 | 34.0-35.2 | 34.6-35.5 | 35.2-35.5 |
|                                     | Oct-Nov-Dec | 34.8-35.2 | 34.5-35.2 | 35.0-35.4 | 35.2-35.4 | 35.3-35.5 |
| Surface oxygen(O <sub>2</sub> ml/l) | Jan-Feb-Mar | 4.4-4.8   | 4.4-5.0   | 4.4-4.7   | 4.5-5.4   | 4.5-5.0   |
|                                     | Apr-May-Jun | 4.5-5.2   | 4.4-4.9   | 4.5-4.9   | 4.5-5.0   | 4.5-4.9   |
|                                     | Jul-Aug-Sep | 4.5-5.1   | 4.7-5.1   | 4.6-5.1   | 4.6-5.0   | 4.8-5.3   |
|                                     | Oct-Nov-Dec | 4.4-4.8   | 4.6-4.9   | 4.5-4.9   | 4.5-5.1   | 4.6-5.2   |
| Depth of homogeneous layer (m)      | Jan-Feb-Mar | 20-80     | 10-70     | 30-40     | 20-60     | 30-80     |
|                                     | Apr-May-Jun | 20-120    | 10-80     | 30-90     | 30-90     | 50-100    |
|                                     | Jul-Aug-Sep | 60-120    | 30-100    | 40-120    | 30-180    | 30-120    |
|                                     | Oct-Nov-Dec | 30-100    | 20-80     | 30-80     | 20-80     | 20-80     |

Figura 10. Parámetros que caracterizaron las aguas superficiales en períodos de tres meses para los cruceros realizados entre 1977 y 1980 (Cândida S., Ruby J. & Dove V., 2002).

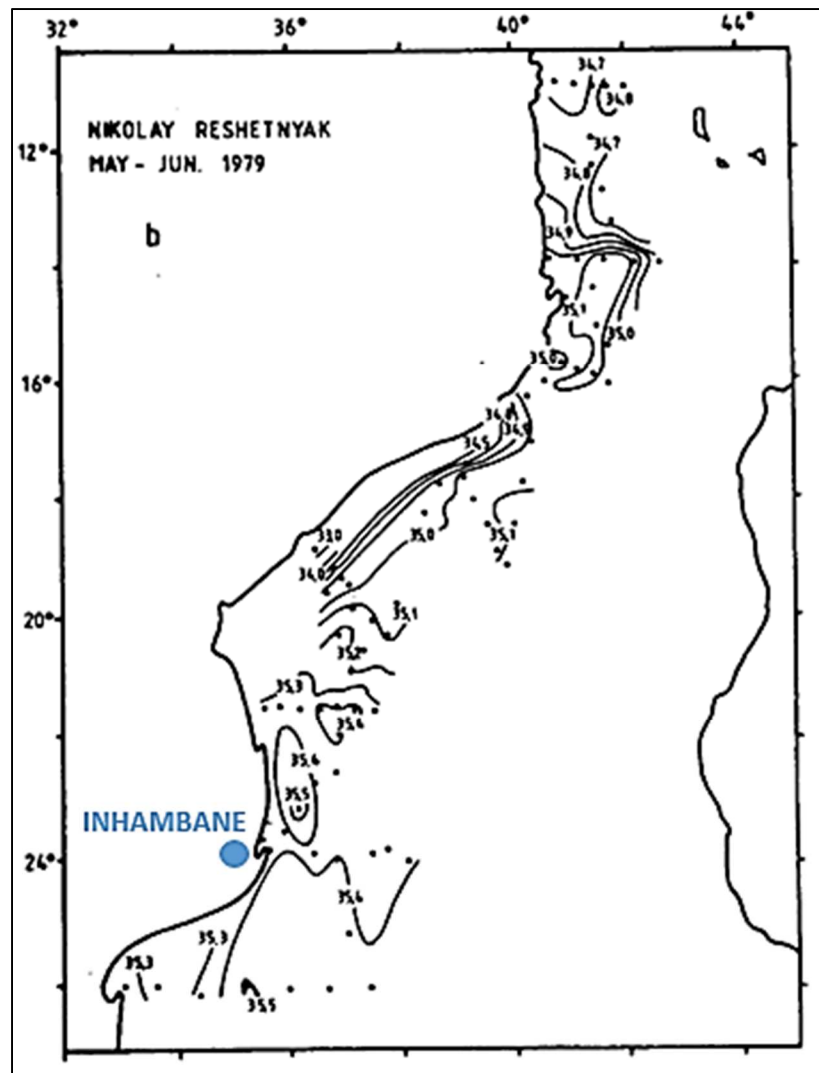


Figura 11. Distribución horizontal típica de la salinidad superficial a lo largo de la costa, mayo - junio de 1979  
(Cândida S., Ruby J. & Dove V., 2002).

La Bahía de Inhambane está comprendida por dos estuarios; el principal, derivado del río *Mutamba*, que se va ensanchando desde su desembocadura en el sur hasta mar abierto y, al noroeste de la bahía, el denominado estuario de *Morrumbene* (Figura 3). Este último tramo se une al principal con forma curva, recogiendo las aguas de riachuelos de la zona, donde el nivel del mar es muy bajo por lo que es explotado como zona de pesca.

De igual manera, hacia la mitad de la bahía, se produce un ensanchamiento marcado hacia el este, donde se encuentra el *Canal da Ilha* que, como veremos más adelante, está fuertemente marcado por la variación de nivel de la marea. Junto con este canal, aparecen otros dos que serán los que marcarán los transectos de las mediciones de CTD analizadas en el presente trabajo: el *Canal Central* y el *Canal Lateral* o *Canal de Maxixe y Mongue* (Figura 12).



Figura 12. Canales principales de la Bahía de Inhambane.

Finalmente, podemos identificar dos poblaciones importantes situadas a ambos lados de la bahía: Inhambane, al este de la misma, y Maxixe en la orilla oeste. Son estas dos ciudades en desarrollo las que dotan de importancia a la Bahía y su estudio, puesto que en un futuro deberán implementar, por ejemplo, sistemas de desagüe de aguas residuales que serán vertidas en ella por lo que será necesario saber, entre otras cosas, el tiempo de permanencia de los vertidos o las corrientes existentes.

Otras zonas a tener en cuenta y que serán usadas a lo largo del presente trabajo para definir las diferentes áreas de estudio (Figura 13) son: *Mongue*, *Ponta da Linga-Linga*, *Nhanduga* e *Ilha dos Porcos*.



Figura 13. Zonas relevantes de la Bahía de Inhambane.

Seguidamente se expondrán las distancias más relevantes, en línea recta para dimensionar la Bahía, referenciadas en la Figura 14:

- (a): Distancia total de la bahía (desde el río *Mutamba* hasta mar abierto): 37km
- (b): Distancia de la parte interior de la bahía (desde el río *Mutamba*): 15km
- (c): Distancia entre las ciudades de Maxixe e Inhambane: 3.5km
- (d): Distancia del ensanchamiento de la bahía al mar abierto: 13km

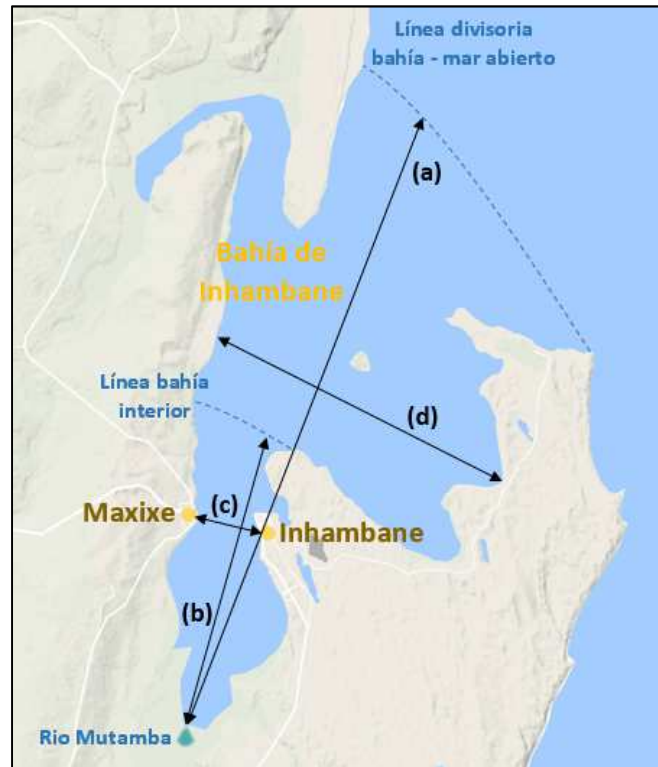


Figura 14. Distancias características de la Bahía de Inhambane.

Usando estas distancias podemos realizar un cálculo aproximado de las dimensiones de la Bahía:

- Zona interior:  $15 \text{ km} \times 3.5 \text{ km} = 52.5 \text{ km}^2$ .
- Zona exterior hasta mar abierto:  $22 \text{ km} \times 13 \text{ km} = 286 \text{ km}^2$ .
- Área total aproximada de la Bahía:  $340 \text{ km}^2$ .

Este trabajo pretende profundizar en el estudio de la hidrodinámica de la Bahía de Inhambane a partir de los datos obtenidos durante la campaña realizada en Julio de 2017, intentando realizar una primera clasificación del estuario en base a las clasificaciones previas y sus características principales, en vista a la posible futura explotación de la zona. Puesto que los datos se centran en una época concreta del año, esto debe ser tenido en cuenta en los próximos análisis y conclusiones.

### 3. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta contribución es describir la hidrodinámica de un área inexplorada, la Bahía de Inhambane. Concretamente, el objeto del presente trabajo, será la caracterización de diferentes variables oceanográficas obtenidas a partir de medidas “in situ” durante la época seca.

Estos objetivos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Estudio de las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad en el interior de la bahía.
- Estimación de la renovación del agua mediante el prisma de marea.
- Caracterización de las corrientes presentes en la zona.
- Caracterización de la intensidad de corriente de marea del estuario.
- Obtención de patrones de comportamiento diario.
- Análisis de los resultados obtenidos para la descripción del comportamiento y el tipo de estuario objeto de estudio.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Descripción de los equipos de medición

A continuación, se procederá a la descripción detallada de los aparatos de medición usados durante la campaña de campo descrita con anterioridad en la Bahía de Inhambane, y que facilitaron los datos que van a ser utilizados en este trabajo. Se expondrán tanto los equipos compactos o comerciales utilizados como los fabricados “in situ”.

Estos últimos tienen como primer objetivo la posibilidad de ser replicados en un futuro con materiales y personal local. El hecho de realizar la campaña en un país en vías de desarrollo hace que la posibilidad de comprar o fabricar ciertos equipos de ámbito científico sea un problema remarcable. Muchas de las campañas llevadas a cabo en lugares de estas características son satisfactorias en primera instancia, pero cuando los aparatos sufren algún daño, la complejidad de los mismos hace difícil su reparación o reposición.

Reforzando la idea anterior, otra de las características de los equipos viene dada por sus componentes, que poseen un coste económico relativamente bajo. Los prototipos usados son simples, sencillos y de fácil montaje, obteniendo unos aparatos “low cost & do it yourself” de medida. Cabe resaltar que el adjetivo “low cost & do it yourself” (bajo-coste & hazlo tú mismo), no debe ser tomado con matices negativos, puesto que la búsqueda de materiales baratos y montaje sencillo en ningún momento compromete la calidad de las medidas. Si bien es cierto que las mediciones obtenidas no son extremadamente exactas, resultan más que suficientes para los objetivos y resultados esperados en el presente trabajo.

El conocimiento pleno de la hidrodinámica de un estuario permite, entre otros, determinar y/o predecir la variación de la línea costera, la variación del nivel del mar, el desplazamiento de vertidos de productos contaminantes, la migración y dinámica de reproducción de las especies marinas, y la predicción de los posibles efectos del cambio climático. Para realizar este estudio de la Bahía y la toma de medidas, se usó un dispositivo CTD, se diseñaron unas boyas lagrangianas o de deriva y una serie de mareógrafos.

#### - Boyas lagrangianas

Una boya lagrangiana es una plataforma diseñada para el seguimiento de las masas de agua y corrientes oceánicas. Para lograrlo, la boya de deriva tiene que incorporar un dispositivo de flotación, y un elemento de arrastre que va sumergido y sujeto al flotador para permitir que las corrientes marinas arrastren este dispositivo.

Gracias a la amplia gama de sensores disponibles se han convertido en una herramienta indispensable en el estudio y protección del medio marino, siendo una solución asequible para la medición de las corrientes superficiales en estuarios y aguas costeras.

En este caso, las boyas usadas para la recogida de datos fueron tres boyas superficiales, que transmitían los datos de su posición vía satélite. El diseño de las mismas se basa en un cilindro de PVC con un contrapeso en su interior que garantiza su estabilidad. En su interior, el sensor GPS y una tarjeta SIM para monitorear en tiempo real su movimiento a través del programa “Traccar Manager” y, como elemento de flotación sujeto al cilindro, una pieza de poliestireno expandido (EPS) que facilita la recogida del dispositivo de la superficie y su visualización a cierta distancia.





Figura 15. Boya lagrangiana o de deriva usada durante la campaña.

#### - Sonda CTD

Una sonda de conductividad, temperatura y profundidad (CTD) es un equipo que permite la realización y monitorización de medidas de perfiles de la conductividad, temperatura, presión, oxígeno disuelto y turbidez, a lo largo de una columna de agua tanto dulce como salada.

A partir de una bomba se provee de flujo constante al aparato a través de los sensores de temperatura y conductividad. El aparato dispone también de un sensor interno de presión. Todos los registros quedan guardados en la memoria para su tratamiento y uso posteriores. De la conductividad se deriva la salinidad, datos que serán la base del análisis propuesto en el presente trabajo.



Figura 16. Sonda CTD usada durante la campaña.

El funcionamiento del CTD sigue un protocolo de actuación; se sumerge el aparato durante unos segundos para su estabilización, se desciende con un lastre a velocidad constante hasta llegar al fondo y, finalmente, se sube el dispositivo hasta la superficie.

## - Mareógrafos

Las medidas del nivel del mar han tenido siempre gran importancia debido a sus múltiples aplicaciones: nivel de referencia en la cartografía terrestre, navegación marítima, obras portuarias, gestión del litoral, etc. Además, en los últimos años, la preocupación por el cambio climático ha llevado a las instituciones nacionales e internacionales a reforzar la coordinación de los sistemas de medida del nivel del mar por su relevancia como indicador del cambio climático y su impacto en las costas; inundaciones, erosión costera, etc. Es por esto que, a pesar de que estos últimos dispositivos fueron experimentales y sus datos no serán objeto de análisis en el presente trabajo, se ha considerado de interés presentarlos de manera sintetizada como equipo complementario.

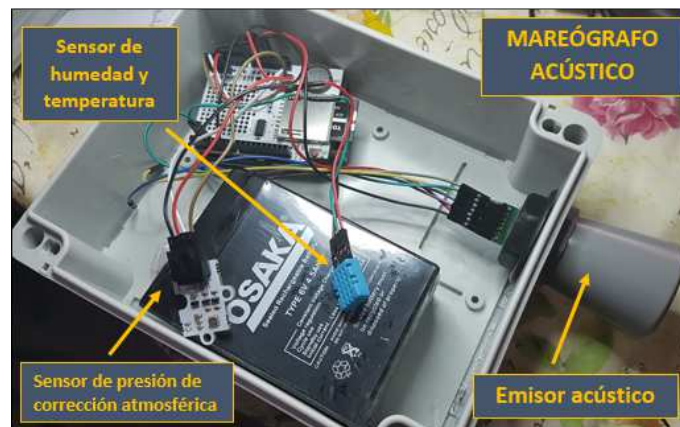


Figura 17. Mareógrafo acústico usado durante la campaña.

El mareómetro o mareógrafo es un aparato que sirve para medir o registrar las mareas, y se suele situar en las entradas de los puertos para orientar e informar a los barcos de la disposición de calado existente.

Se diseñaron dos tipos de mareógrafos que se instalaron en el pantalán de Inhambane con el objetivo de medir el rango de marea de la zona; el acústico y el de presión. El primero, formado por un emisor acústico, un sensor de presión de corrección atmosférica y otro capaz de medir la humedad y la temperatura, instalado a una cierta altura sobre el nivel del agua (Figura 17). El segundo, con un sensor medidor de la presión y la temperatura y un reloj, instalado bajo la superficie a una distancia conocida (Figura 18).

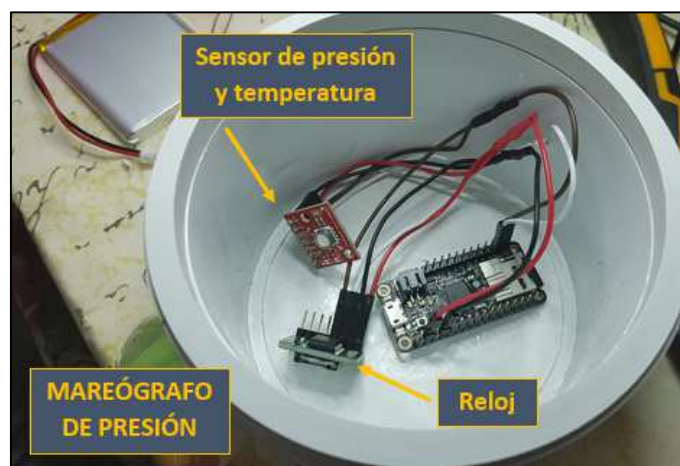


Figura 18. Mareógrafo de presión usado durante la campaña.

## 4.2. Campaña CTD

A partir de una sonda CTD podemos obtener información, entre otras, de la conductividad, la temperatura, la profundidad y la presión a lo largo de una columna de agua. A partir de estos datos podemos hallar la salinidad y la densidad de la misma.

La ecuación de estado de la UNESCO (1980) establece que la densidad del mar en una atmósfera patrón ( $p = 0$ ) se puede determinar a partir de la temperatura y la salinidad como:

$$\rho(S, T, 0) = \rho_w + (b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 + b_3 \cdot T^3 + b_4 \cdot T^4) \cdot S + (c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2) \cdot S^{3/2} + d_0 \cdot S^2$$

*Ecuación 1*

Donde,

|                               |                                |
|-------------------------------|--------------------------------|
| <i>S</i> : Salinidad          | <i>T</i> : Temperatura         |
| $b_0 = 8,22493 \cdot 10^{-1}$ | $c_0 = -5,72466 \cdot 10^{-3}$ |
| $b_1 = -4,0899 \cdot 10^{-3}$ | $c_1 = 1,0227 \cdot 10^{-4}$   |
| $b_2 = 7,6438 \cdot 10^{-5}$  | $c_2 = -1,6546 \cdot 10^{-6}$  |
| $b_3 = -8,2467 \cdot 10^{-7}$ | $d_0 = 4314 \cdot 10^{-4}$     |
| $b_4 = 5,3875 \cdot 10^{-9}$  |                                |

La densidad del agua de referencia viene dada por UIOPA (1976).

$$\rho_w = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5$$

*Ecuación 2*

Donde,

|                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| $a_0 = 999,842594$              | $a_3 = 1,001685 \cdot 10^{-4}$  |
| $a_1 = 6,793952 \cdot 10^{-2}$  | $a_4 = -1,120083 \cdot 10^{-6}$ |
| $a_2 = -9,095290 \cdot 10^{-3}$ | $a_5 = 6,536332 \cdot 10^{-9}$  |

La representación en curvas de nivel de la densidad en función de diversos valores de temperatura y salinidad se muestra a continuación:

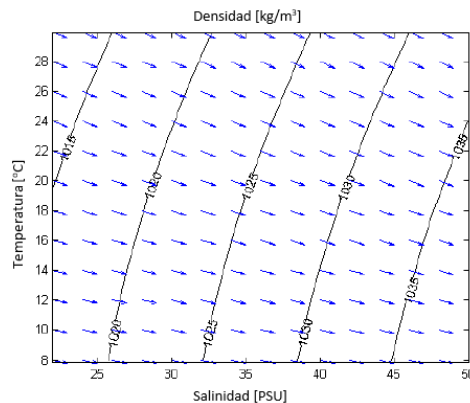


Figura 19. Representación de la densidad en función de la temperatura y la salinidad mediante la ecuación de estado de la UNESCO (1980).

Las flechas representan la dirección de máxima pendiente de la función, es decir, el gradiente de la densidad. Comparando su dirección según el eje de salinidades y el eje de temperaturas, se aprecia que la componente de la salinidad es mayor que la componente de la temperatura en cualquier densidad y, por tanto, la densidad es más sensible a los cambios de salinidad que de temperatura.

El aparato empleado en este proyecto fue un CTD SD204 facilitado por la empresa Innova (Figura 16).

En Julio de 2017 se llevaron a término la campaña CTD en la Bahía de Inhambane. Concretamente fue una campaña con una duración de 9 días. Los 6 primeros días se realizaron mediciones de perfiles discretos en diferentes puntos, como es usual con este tipo de aparatos. De éstos, el primer día no se obtuvieron datos debido a un fallo en la descarga del fichero. Los últimos 3 días se llevaron a cabo pruebas de mediciones continuas de la superficie del estuario adaptando el CTD a una plataforma flotante y una sonda. Estas mediciones no resultaron muy precisas ni representativas, por lo que no se estudiarán en el presente trabajo.

Así, finalmente, discriminando los días y mediciones nombradas, se cuenta con una serie de datos obtenidos durante 5 días, llevadas a cabo en diferentes zonas de la Bahía:

- 13/07: *Canal de Maxixe, Mongue y Morrumbene (Canal Lateral).*
- 14/07: *Canal Central.*
- 18/07: *Pantalán de Inhambane (punto fijo, diferentes horas).*
- 19/07: *Ponta da Linga-Linga.*
- 20/07: *Canal da Ilha.*

Cada día de campaña se definieron una serie de transectos transversales y longitudinales donde se llevaron a cabo las mediciones de los perfiles. En la Figura 20 se aprecia la situación de los diferentes transectos empleados durante los diferentes días, referenciados con el programa “Handy GPS” utilizado en la campaña.

Previa a la figura nombrada, se presenta la siguiente tabla donde se resumen las letras utilizadas para denominar cada uno de los transectos con el color y el significado con el cual están representados en la Figura 20.

| <i>Representación en el plano</i> | <i>Transecto</i> | <i>Significado</i>                                |
|-----------------------------------|------------------|---|
| Bandera azul                      | M                | Canal Lateral ( <i>Maxixe-Mongue-Morrumbene</i> ) |
| Bandera roja                      | C                | Canal Central                                     |
| Punto rojo                        | R                | Punto Referencia ( <i>Pantalán</i> )              |
| Punto verde                       | H                | Punto auxiliar ( <i>High Resolution</i> )         |
| Bandera verde                     | I                | Canal da Ilha                                     |

*Tabla 1. Transectos CTD.*

El resto de símbolos que aparecen en dicha figura y no aparecen con significado en la tabla anterior (barco azul y casa verde), se tratan de otros puntos referenciados durante el trabajo de campo, independientes a la campaña CTD.

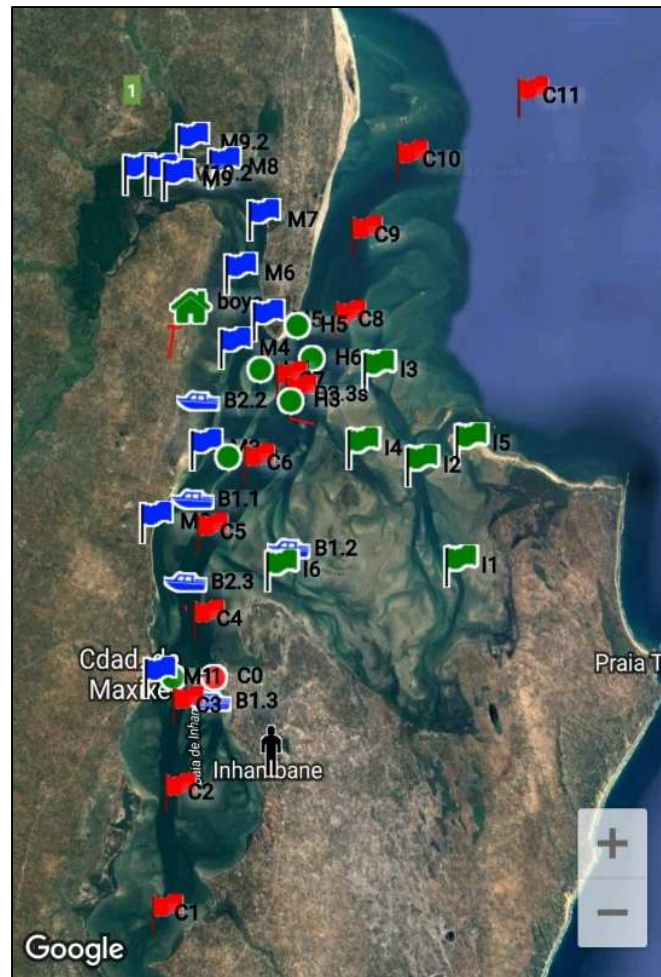


Figura 20. Situación de los diferentes transectos empleados en las campañas CTD.

El número total de perfiles CTD medidos que no han resultado erróneos, y que por tanto serán los que se tendrán en cuenta en este trabajo, han sido 56.

Al inicio de la campaña, con el fin de asegurar la precisión de las observaciones del aparato utilizado, se realizaron unas mediciones en un punto del pantalán de Inhambane con resultados contrastados, calibrando correctamente la sonda CTD.

Durante dicha campaña, no se pudieron tomar medidas de la totalidad de los puntos referenciados “in situ” sobre la carta náutica. Esto fue debido a la imposibilidad de llegar a ellos por la diferencia del nivel de marea durante las jornadas o por la existencia de barras de arena en el fondo que no permitían la navegación de la embarcación.

Las unidades en las que se trabajará son:

- Temperatura: grados Celsius, °C.
- Salinidad: PSU, expresa los gramos de sal por litro de solución.
- Densidad:  $\sigma_t$  (kg/m<sup>3</sup>),  $\sigma_t = \rho - 1000$ .

Además, durante la medición de los perfiles CTD, se registraban datos de la dirección y velocidad del viento en el mismo punto, como datos complementarios a los obtenidos y que ayudarán en el contraste de las trayectorias realizadas por las boyas de deriva en la caracterización de las corrientes de la Bahía.



### 4.3. Campaña de boyas lagrangianas

Las corrientes de marea suelen ser de tipo semidiurno, existiendo desigualdades en intensidad entre las diferentes direcciones de las mismas. Tienen períodos y ciclos parecidos a las de las mareas en sí, estando sujetas a variaciones similares, aunque no ocurren forzosamente a la vez. Su velocidad máxima de desplazamiento incrementa y decrece a lo largo de un período de dos semanas, mensual y anual, de modo que las corrientes más fuertes se dan en mareas vivas, y las más débiles en mareas muertas (Martínez de Osés 2006).

En los estuarios, el momento de producirse la corriente de marea varía a través del canal de una orilla a la otra. En promedio, la corriente gira antes cerca de la orilla que en mitad de la cuenca donde su velocidad es mayor. Las diferencias oscilan entre media y una hora, aunque este fenómeno puede verse enmascarado por los flujos de corrientes que no son de marea.

Así, durante el proyecto de cooperación en la Bahía de Inhambane, también se llevaron a cabo mediciones de las corrientes estuáricas presentes en la misma con el objetivo de ampliar el estudio de la hidrodinámica de la zona de estudio y caracterizar las intensidades de corrientes de marea.

Estas mediciones fueron realizadas a través de tres boyas de derivada numeradas (similares a la detallada en la Figura 15), obteniendo diferentes trayectorias de las corrientes existentes a través de la Bahía, la dirección y la velocidad de las mismas. Los datos obtenidos se registraron a través del “Traccar Manager”, la aplicación GPS que permitía el seguimiento de las boyas y la grabación de su posición y velocidad, entre otras variables, en tiempo real.

El proceso consistió en la suelta de las boyas en los puntos fijados previamente y su recogida al cabo de un periodo de tiempo; cuando había recorrido una distancia considerable, las corrientes eran demasiado débiles para moverla o su comportamiento era el previsto.

Al igual que la campaña CTD, la campaña de boyas lagrangianas tuvo lugar en Julio de 2017, y tuvo una duración de 5 días.

- 19/07: Boya 1.
- 20/07: Boya 1, Boya 2, Boya 3.
- 21/07: Boya 1, Boya 2.
- 25/07: Boya 1, Boya 2.
- 26/07: Boya 1.

Los principales objetivos de esta parte de la campaña fueron el análisis de las direcciones tomadas por las boyas de deriva, su intensidad o velocidad máxima alcanzada y la comparación de las distintas intensidades entre las corrientes de marea existentes en la Bahía. Todo ello influenciado por el tipo de marea, llenante (*Flood*) o vaciante (*Ebb*), que se daba durante el periodo de deriva (inicio y recogida).

A continuación se procederá a presentar los tiempos de deriva registrados por las boyas en los días de campaña, además del tipo de marea existente, y una imagen con los puntos de inicio de cada trayectoria (Figura 21). Para poder diferenciar las trayectorias de las diferentes boyas cada día, se ha decidido añadir “.#” en referencia al día de campaña. Por ejemplo, el trayecto de la Boya 2, el día 20/07, se denominará como “B2.20”.

| <i>Trayecto</i> | <i>Hora inicio [h]</i> | <i>Tipo marea inicio</i> | <i>Hora final [h]</i> | <i>Tipo marea recogida</i> |
|-----------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|
| B1.19           | 10:23                  | Flood                    | 13:32                 | Ebb                        |
| B1.20           | 06:54                  | Flood                    | 12:10                 | Flood                      |
| B2.20           | 07:10                  | Flood                    | 11:29                 | Flood                      |
| B3.20           | 07:23                  | Flood                    | 10:20                 | Flood                      |
| B1.21           | 07:43                  | Flood                    | 12:31                 | Flood                      |
| B2.21           | 08:04                  | Flood                    | 12:06                 | Flood                      |
| B1.25           | 07:02                  | Ebb                      | 10:35                 | Flood                      |
| B2.25           | 07:17                  | Ebb                      | 10:20                 | Flood                      |
| B1.26           | 08:40                  | Ebb                      | 10:39                 | Ebb                        |

*Tabla 2. Duración y tipo de marea en las trayectorias de las boyas lagrangianas.*



*Figura 21. Puntos de inicio de las trayectorias de las boyas lagrangianas.*

Al inicio de la campaña, con el fin de asegurar la precisión de las observaciones de los aparatos utilizados, durante el primer día de suelta de la Boya 1, se siguió su recorrido con la embarcación utilizando un GPS manual.

Debido a problemas durante el trabajo de campo, dos de las boyas se perdieron; el día 20/07 la Boya 3, y el 25/07 la Boya 2, por lo que sus trayectorias no son completas y sólo se representarán hasta el punto de su extravío, como si fuera el de recogida. Así, el número total de trayectorias obtenidas por las boyas lagrangianas han sido 9.

La dirección de las corrientes de marea, que será analizada más adelante, se expresa según la trayectoria que describe. Si por ejemplo una corriente avanza por la costa desde el norte hacia el sur, se dice que esta corriente es Sur o que tiene una dirección de 180°. Justo al contrario que ocurre con el viento, en donde se indica la dirección de donde viene, no a donde va. Entre las dos corrientes en direcciones opuestas debidas a las mareas, existen períodos en donde no hay movimiento de masas de agua que no tienen por qué corresponder exactamente con la pleamar o la bajamar. Por ello el cambio de dirección de la corriente no se produce justo al cambiar la marea.

Las unidades en las que se trabajará son:

- Coordenadas (latitud, longitud): grados sexagesimales, °.
- Velocidad: kilómetros por hora (m/s).
- Distancia: metros (m).
- Tiempo: hora GMT (h).
- Intensidad o fuerza: nudos (1 m/s = 1.94 nudos)

#### 4.4. Ocean Data View (ODV)

El software "Ocean Data View" (ODV) (Schlitzer 2010) es un software muy versátil para obtener, analizar y visualizar datos oceánicos, perfiles geo-referenciados o datos en secuencias temporales, en plataforma Linux, Mac OS o Windows. Los archivos de datos del ODV son independientes de las plataformas y pueden ser intercambiadas entre los diferentes sistemas.

Permite trabajar y analizar conjuntos extensos de datos, así como extraer de manera sencilla varias tipologías de gráficos, incluyendo gráficas de propiedad-propiedad de una o más estaciones, gráficas de dispersión de las estaciones que se desee, gráficas de secciones o distribuciones superficiales de la propiedad que se desee. Es capaz de representar datos escalares y vectoriales mediante puntos de colores, valores numéricos o flechas. Además, permite visualizar los datos según un algoritmo que proporciona estimaciones en puntos sin valor entre los datos medidos, por lo que se genera un sombreado en color en toda una sección o superficie y en su contorno.

ODV es capaz de importar datos en un amplio abanico de formatos. En este trabajo, se importarán los archivos provenientes de los CTD, modificados al formato .csv, puesto que los datos originales extraídos eran en .txt, formato que el ODV no puede reconocer. Cada uno de los ficheros .csv es la medición del perfil en profundidad de un punto georreferenciado. Cada punto se denomina estación. El formato de un archivo .csv debe contener una serie de información necesaria para que el programa sea capaz de leer la información de manera correcta (latitud y longitud de la estación, nombre y rango de las variables...), y en un formato muy concreto. Tal y como se explica más adelante, se ha tenido que hacer un proceso previo de adecuación de los archivos al formato deseado.

El programa tiene un gran potencial considerando que puede servir como una base de datos de toda la información de la que se dispone. A cada estación le corresponde una ID, es decir, cada archivo tiene una ID asociada. Adicionalmente, el programa permite caracterizar cada ID con un



crucero, por lo que se pueden agrupar varias ID con un crucero. En este caso, para que el análisis sea más sencillo, se han agrupado las ID de campaña, por lo que cada jornada corresponde a un crucero. Así, el ODV permite el análisis de los cruceros. Además, se puede restringir el análisis de los datos por días, horas... o simplemente mediante zonas geográficas, por lo que resulta muy interesante realizar una base de datos en el ODV con todos los datos de los que se dispone, ya que su análisis resulta relativamente sencillo.

#### 4.5. Depuración de datos CTD

Inicialmente, se parte de todos los archivos que contienen la información registrada de los CTD. Se trata de unos archivos de texto con formato .txt. Cada vez que se toman medidas de un punto, se obtiene un archivo de datos. Así pues, el total de perfiles medidos con el CTD durante todas las campañas que han resultado ser válidos fueron de 56. Estos archivos ya tienen un tratamiento previo en el que se extrajeron las variables registradas por los CTD (temperatura, conductividad y presión) y las variables que se derivan de estas que interesaban (salinidad, densidad...), en un formato homogéneo. De todos modos, como ya se ha nombrado, el ODV no es capaz de leer este formato, por lo que se tuvieron que modificar y ajustar al formato .csv.

Ahora bien, a fin de que el programa utilizado para llevar a cabo el trabajo y analizar estos datos (OceanDataView) sea capaz de leerlos correctamente ha sido necesaria una fase de pretratamiento de datos. En esta se han realizado las siguientes acciones:

- Introducir los datos .txt en el programa Excel, para poder modificar los mismos y transformar el formato del fichero.
- Realizar una cabecera específica para la lectura de datos por parte del ODV, en la primera fila del archivo con el nombre de las variables.
- Incluir en cada uno de los archivos la latitud y longitud de los puntos donde se han tomado las medidas en el formato adecuado, extraídas de las anotaciones en libretas de campo que se llevaron a cabo durante las campañas. Este es el único requisito impuesto por el ODV, que necesita la localización espacial de las observaciones al ser un programa georreferenciado.
- Homogeneizar las coordenadas de los puntos. En las diversas campañas se tomaron medidas en puntos comunes, ahora bien, las coordenadas de los puntos que se anotan en cada toma de datos, al ser manual, no es exactamente la misma. Así pues, se hace la media de todas las coordenadas de cada punto, obteniendo así, la latitud y longitud de cada punto que se tendrá en cuenta.
- Guardar el archivo en formato .csv separado por comas.
- Finalmente se han debido eliminar algunos datos erróneos, que diferían mucho de los valores habituales; los datos iniciales del perfil, correspondientes a la estabilización del CTD; los valores correspondientes a la subida del aparato, realizada con demasiada rapidez; datos puntuales con mediciones demasiado alejadas del perfil en el que se encuentran.

#### 4.6. Tratamiento de datos de boyas lagrangianas

Como ya se ha adelantado en el presente texto, la herramienta utilizada para la obtención de los datos registrados por las boyas de deriva durante la campaña de Julio de 2017 fue el *Traccar Manager*. Esta aplicación móvil es un servidor de código abierto gratuito que soporta más de 100 diferentes protocolos y dispositivos de localización GPS. Para gestionar los dispositivos se necesita registro de usuario en <http://demo.traccar.org/>.

Así, vinculado a cada boya de deriva permitió su seguimiento en tiempo real. Además, a través del mismo programa, se pueden obtener tanto las trayectorias dibujadas sobre el mapa de la zona como un archivo en formato Excel donde aparece la información relevante de las mismas.

| Report  | Route                                     |            |           |          |          |                            |   |
|---------|---|------------|-----------|----------|----------|----------------------------|---|
| Device: | BOYA_01                                   |            |           |          |          |                            |   |
| Group:  |   |            |           |          |          |                            |   |
| Period: | 2017-07-20 09:10:00 - 2017-07-20 12:10:00 |            |           |          |          |                            |   |
| Valid   | Time                                      | Latitude   | Longitude | Altitude | Speed    | Address                    | Attributes  |
| TRUE    | 2017-07-20 09:10:20                       | -23.742655 | 35.422939 | 0 m      | 2.1 km/h | R. da Farol, Inhambane, MZ | battery=74 hdop=164.5 ip=197.218.88.199 distance=12.13 totalDistance=1.0656816988E8 |
| TRUE    | 2017-07-20 09:10:55                       | -23.742775 | 35.422920 | 0 m      | 1.8 km/h | R. da Farol, Inhambane, MZ | battery=74 hdop=179.4 ip=197.218.88.199 distance=13.5 totalDistance=1.0656818338E8  |
| TRUE    | 2017-07-20 09:11:31                       | -23.742887 | 35.422920 | 0 m      | 2.2 km/h | R. da Farol, Inhambane, MZ | battery=74 hdop=186.6 ip=197.218.88.199 distance=12.47 totalDistance=1.0656819585E8 |
| TRUE    | 2017-07-20 09:12:06                       | -23.742990 | 35.422913 | 0 m      | 2.3 km/h | R. da Farol, Inhambane, MZ | battery=74 hdop=181.5 ip=197.218.88.199 distance=11.49 totalDistance=1.0656820734E8 |
| TRUE    | 2017-07-20 09:12:42                       | -23.743111 | 35.422894 | 0 m      | 1.5 km/h | R. da Farol, Inhambane, MZ | battery=74 hdop=202.8 ip=197.218.88.199 distance=13.61 totalDistance=1.0656822095E8 |

Figura 22. Ejemplo de archivo de los datos registrados por una boya lagrangiana.

Como podemos observar en la anterior imagen, en el archivo aparece el tiempo, la posición, la velocidad y diferentes atributos cada 30 segundos aproximadamente. Dentro de los atributos encontramos datos de interés como la distancia total recorrida por la boya.

Una vez obtenido el archivo Excel se debe proceder a una depuración y tratamiento de los datos que permitan la obtención de los resultados requeridos:

- Identificación del inicio y final de la trayectoria, puesto que el GPS comienza a emitir señales antes de que las boyas se introduzcan en el agua.
- Identificación de puntos de cambio de dirección o *slack water* que puedan afectar a la trayectoria y su velocidad, que pasaremos de km/h a m/s.
- Cálculo de la distancia total recorrida por cada boya lagrangiana.
- Introducción del tipo de marea durante el periodo de deriva para la comprensión de los resultados.
- Comparando los datos de posición del archivo Excel y del trazo de la trayectoria sobre el mapa, obtención de la dirección y sentido seguidos por la boya.
- Búsqueda y cálculo con las herramientas internas de Excel de la velocidad media de cada trayectoria analizada y su intensidad o velocidad máxima, que se debe convertir finalmente a nudos.

## 5. RESULTADOS

A continuación se analizan todos los datos tratados. Primero se llevará a cabo un estudio mediante los perfiles CTD de todos los datos y de los perfiles medios de cada una de las variables a analizar (temperatura, salinidad y densidad), con el objetivo de poder ver la tendencia general dentro de la Bahía de Inhambane. Seguidamente se realizará un análisis espacial de los datos a diferentes profundidades y diferentes secciones verticales por transectos; el *Canal Central*, el *Canal Lateral*, el *Canal da Ilha* y el estuario de *Morrumbene*. Por último, se hará una comparativa, a través de un análisis temporal y de mareas, de perfiles con posición fija en diferentes periodos de tiempo.

Finalmente se expondrán los resultados de las trayectorias realizadas por las boyas lagrangianas, con el fin de observar el comportamiento general de las corrientes de marea y sus intensidades dentro de la Bahía, tanto espacial como temporalmente.

Es necesario resaltar el hecho de que, a pesar de tomar como referencia fija para la elaboración de los gráficos la superficie del agua (línea de presión 0), en nuestro caso lo que permanece constante es el fondo del estuario. La sonda CTD era bajada hasta apoyar en él, recorriendo la profundidad total. Así, lo que realmente varía en los perfiles es la parte superficial de la masa de agua, influenciada por las mareas. La decisión de no invertir la escala de valores de la presión en el graficado de datos se ha realizado con el objetivo de poseer una mayor facilidad en su análisis.

### 5.1. Perfiles de las mediciones CTD

En las siguientes imágenes se pueden observar los perfiles de salinidad, temperatura y densidad de todas las mediciones CTD y los perfiles medios de cada una de las jornadas de la campaña de julio de 2017.

Cabe remarcar que, al usar todos los perfiles, se obtiene una situación media en cuanto a fases de marea. Este resultado no resulta un problema debido a que, además de ser conscientes de ello para el análisis posterior de los datos, una media de valores de las fases marea es, generalmente, la situación que se puede esperar en un estuario de mezcla completa.

Es por esto que durante el presente apartado no se dividirán los perfiles y/o resultados obtenidos en función de la marea existente, si no que se hará uso de la totalidad de ellos.

### 5.1.1. Perfiles de temperatura

Los perfiles de temperatura media permiten cuantificar el grado de estratificación. En este caso podemos observar como los perfiles obtenidos son bastante homogéneos, que indican una mezcla total del agua del estuario; la temperatura del agua marina registra temperaturas elevadas en superficie, acercándose a los 30 °C, un comportamiento habitual en climas tropicales como el de Inhambane (Petroni, 2005). Además, el volumen de río es insignificante comparado con el volumen de marea, lo que favorece esta situación.

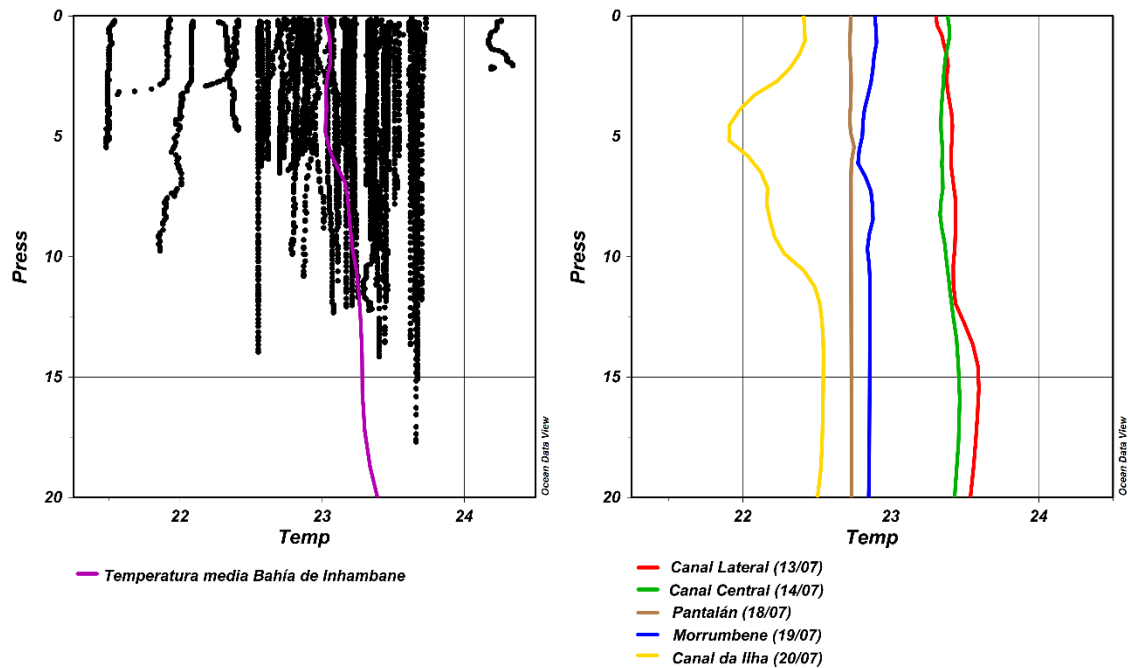


Figura 23. A) Perfiles de temperatura y temperatura media de todas las mediciones CTD. B) Perfiles de temperatura jornadas de campaña.

Observando los perfiles de temperatura de todos los datos se puede distinguir un gran bloque central, que abarca la mayoría de las medidas y que se sitúa entre los 22.5 °C y los 23.7 °C. La temperatura media del estuario es de 23.38 °C. Existe sólo un perfil por encima de estos valores, el M1 con 24.34 °C, siendo la máxima temperatura alcanzada. En el lado opuesto, con las temperaturas más bajas, encontramos los puntos pertenecientes al *Canal da Ilha* (I1, I2, I3, I4) y el punto de referencia R0. La mínima temperatura registrada es 21.48 °C, del perfil I1. También se puede observar que cada uno de los perfiles presenta una temperatura más o menos constante en relación a la profundidad.

Finalmente, cabe añadir que la profundidad máxima registrada en el estuario es de 17.69m, correspondiente a la estación C8. Este punto pertenece al *Canal Central* y se encuentra en las proximidades de mar abierto, al oeste de *Ponta da Linga-Linga*. La posición de dicha estación aparece coloreado en rojo en la Figura 24, acompañada de la totalidad de puntos de medición CTD de la campaña, coloreados en azul.

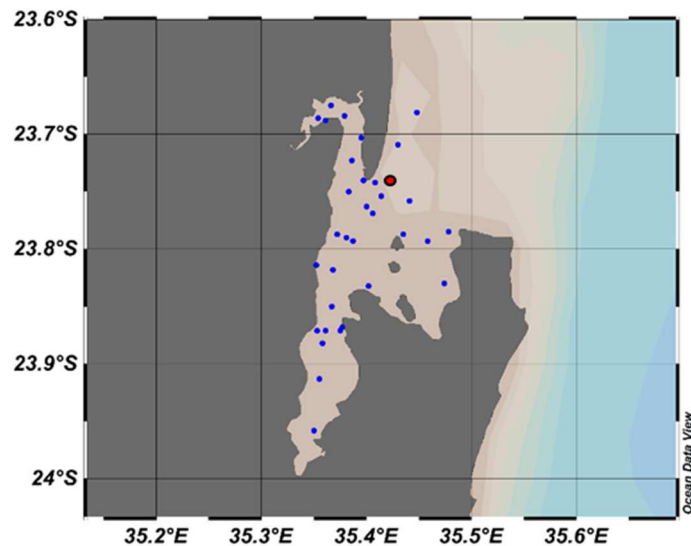


Figura 24. Situación del punto de máxima profundidad C8, coloreado en rojo.

### 5.1.2. Perfiles de salinidad

En cuanto a los perfiles de salinidad se observa que, al igual que para la variable temperatura, los perfiles son bastante homogéneos con algunas excepciones. La salinidad media del estuario es de 33.82 PSU; el valor máximo recae en el punto I1, del *Canal da Ilha*, y el mínimo en el M9.2, en el interior del estuario de *Morrumbene*, coincidiendo con las aportaciones de agua dulce de la zona. Los valores son 35.81 PSU y 26.78 PSU respectivamente. En general, se presentan salinidades menores en la superficie, excepto en la zona del *Canal da Ilha* donde las salinidades presentan valores superiores en la superficie.

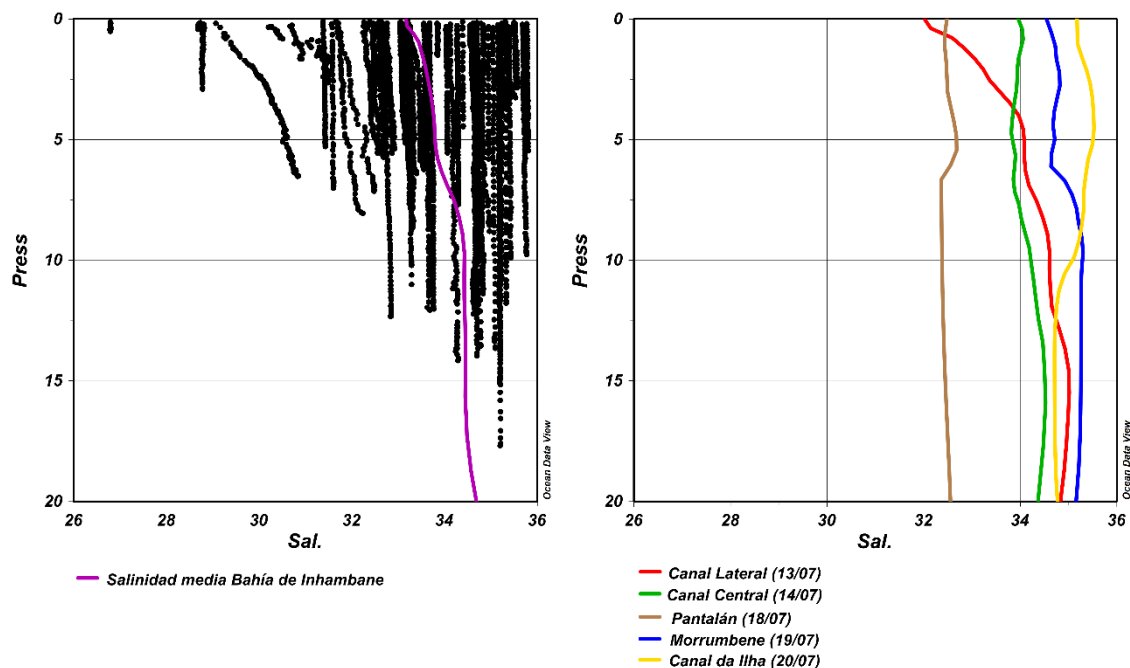


Figura 25. A) Perfiles de salinidad y salinidad media de todas las mediciones CTD. B) Perfiles de salinidad media por jornadas de campaña.

### 5.1.3. Perfiles de densidad y diagrama T-S

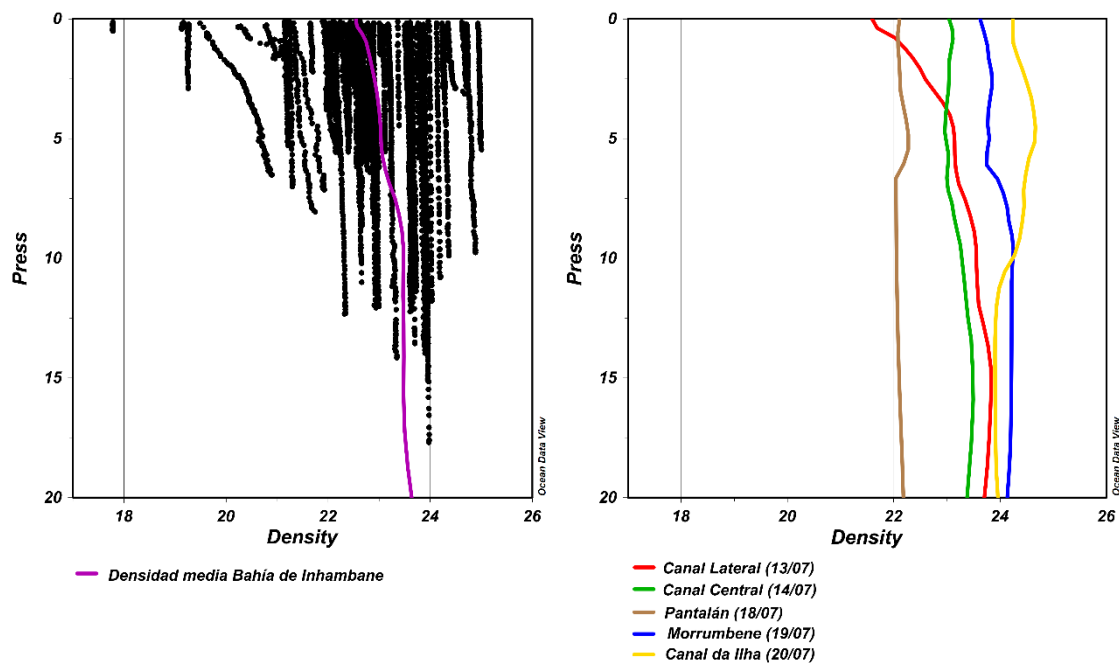


Figura 26. A) Perfiles de densidad y densidad media de todas las mediciones CTD. B) Perfiles de densidad media por jornadas de campaña.

Análogamente a los perfiles de salinidad, los mayores valores de la densidad se registran en la zona del *Canal da Ilha*, siendo su máxima  $25.00 \text{ kg/m}^3$  en el punto I1. Los valores de menor densidad se sitúan en la zona de *Morrumbene*, donde la estación M9.2 vuelve a tener el mínimo con  $17.77 \text{ kg/m}^3$ . De la misma manera, los perfiles presentan una homogeneidad de valores, resultando perfiles prácticamente verticales y reforzando la idea de un estuario de aguas bien mezcladas.

La densidad, que es una variable consecuencia de la salinidad y la temperatura, sigue la misma tendencia que los perfiles de salinidad. Las masas de agua más frías son más densas, al igual que las masas de agua más salinas son más densas. Es por esto que, además de los perfiles de densidad en función de la presión, se presenta un gráfico de dispersión que combina las tres variables, el diagrama T-S (Figura 27).

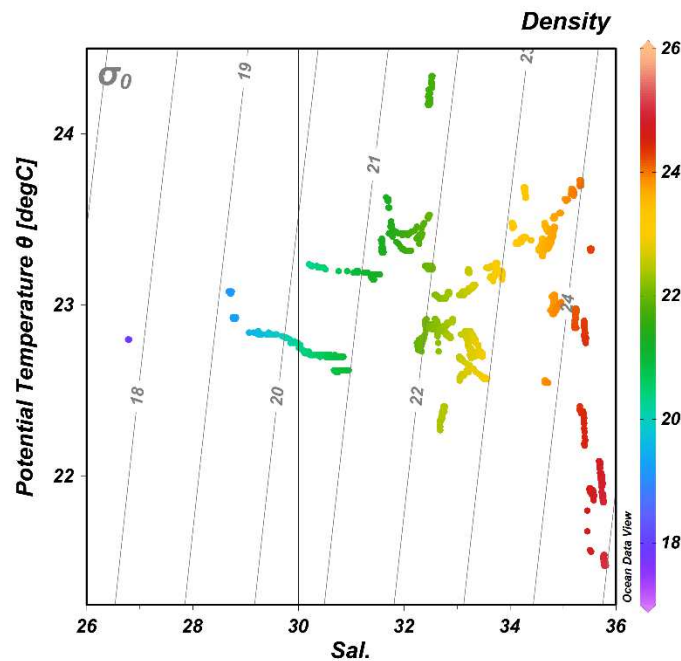


Figura 27. Gráfico de dispersión T-S de todas las mediciones CTD.

Cómo síntesis de lo que hemos ido viendo durante el presente apartado, los puntos de menor densidad (representados en tonos azules en la Figura 27), corresponden a la zona del estuario de *Morrumbene*. Los de mayor densidad, y por tanto mayor salinidad (tonos rojos), resultan ser los del *Canal da Ilha*. El resto de mediciones (tonos verdes y amarillos) se sitúan en valores medios de estas dos zonas.

Puesto que los perfiles de temperatura, salinidad, densidad y los diagramas T-S de cada transecto están incluidos en los gráficos anteriores, se ha decidido no incluirlos por separado en esta sección. Así, los perfiles específicos de cada transecto se encuentran en el anejo A del presente trabajo.

## 5.2. Secciones de las mediciones CTD

A continuación, se presentan diferentes secciones a diferentes profundidades de la Bahía de Inhambane y las secciones verticales de cada transecto estudiado. Permitiendo un análisis espacial de las mediciones obtenidas.

Al igual que ocurría con los perfiles, en este apartado también se han tenido en cuenta todas las mediciones realizadas, dando lugar a una situación media de fase de marea en los resultados obtenidos.

### 5.2.1. Secciones de superficie

#### - Temperatura

La distribución espacial de la temperatura de la campaña de Julio de 2017 (Figura 28) muestra unas temperaturas en superficie entre los 21 y 24.5 °C. La temperatura es inferior en la zona del *Canal da Ilha* (zona azulada). En profundidad se observa la misma tendencia, con rangos similares de temperatura, como cabía esperar después de ver los perfiles anteriores (Figura 23).

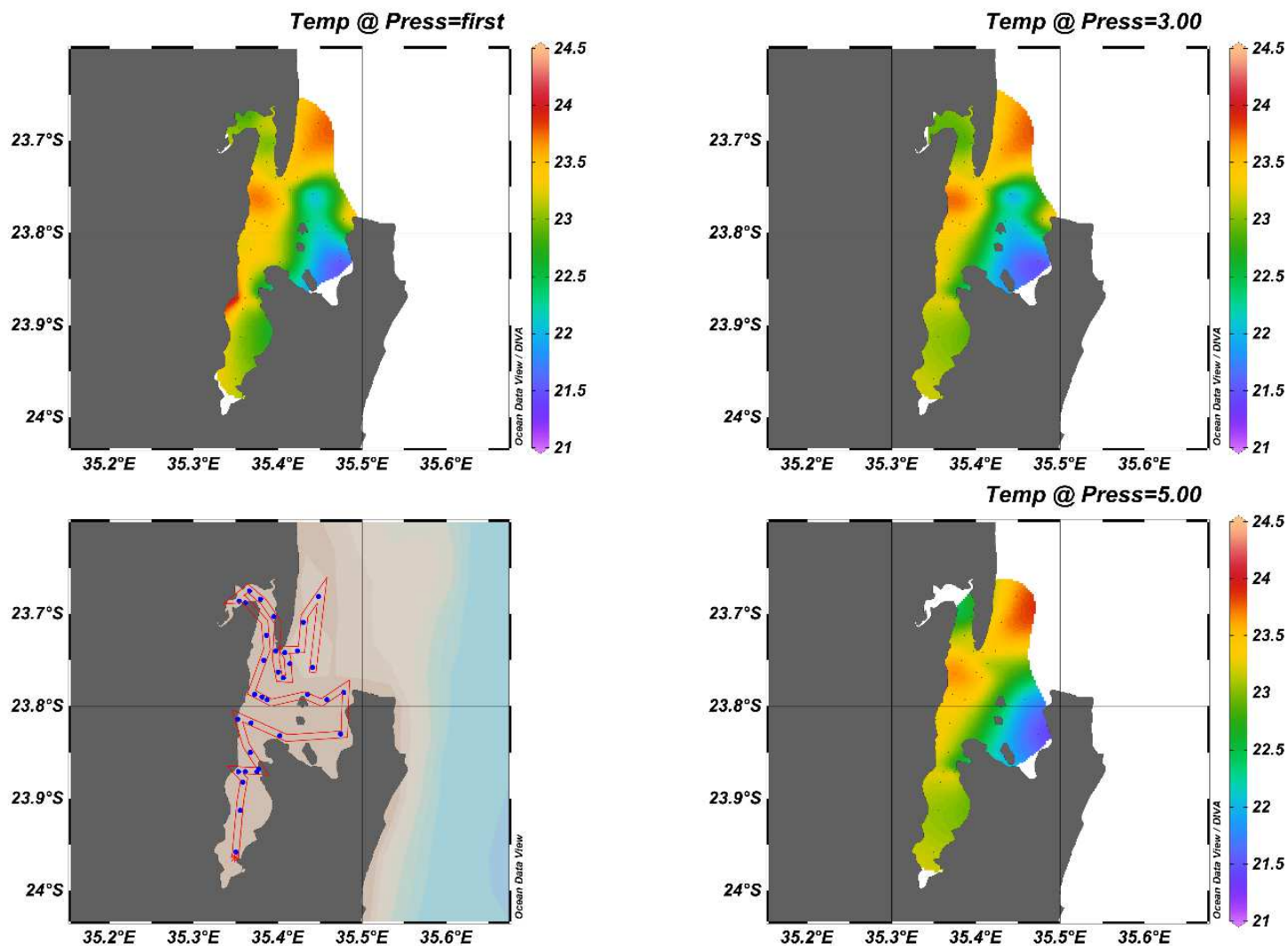


Figura 28. A) Temperatura en la superficie. B) Temperatura a 3m de profundidad. C) Temperatura a 5m de profundidad.



En las distribuciones de temperatura previas podemos observar que, en ciertas zonas como en el *Canal da Ilha*, las aguas de los ríos son más cálidas que las provenientes del mar. A su vez, vemos como, siguiendo el comportamiento de un estuario bien mezclado presentado en la Figura 6, y reforzando ese significativo resultado, tenemos una circulación donde las aguas más frías penetran en el estuario desde el mar por la zona del *Canal da Ilha* (este) y salen de él por la zona de *Linga-Linga* (oeste). La circulación de las aguas se produce en sentido horario (y no al contrario como en la citada Figura 6) debido a la situación geográfica de Inhambane en el hemisferio sur.

Este hecho, se debe a la separación de las corrientes residuales existentes en función del hemisferio. Así, se genera una corriente lateral que diferencia una zona de aguas más saladas y otra de aguas más dulces; que como ya sabemos, guardan una importante relación con la temperatura.

Por último, anotar que la zona norte de *Linga-Linga* debería tener temperaturas más elevadas, (colores rojos), pero debido a la interpolación matemática que realiza el programa con la zona del *Estuario de Morrumbene*, hace que se obtengan valores más bajos.

#### - Salinidad y densidad

En este caso podemos analizar las variables de la salinidad y la densidad conjuntamente debido a su similitud en el comportamiento (Figura 29 y Figura 30). Ambas distribuciones muestran, de igual manera que la temperatura, una distribución espacial constante, sin signos de estratificación en la Bahía.

En relación a la salinidad, su rango de valores se encuentra entre 26 y 36 PSU, mostrando tres zonas diferenciadas con un alto gradiente: la zona de *Morrumbene* y el inicio del *Canal Central* en el interior del estuario, con los valores más bajos (zonas azuladas y verdosas); y la zona próxima a mar abierto (zona rojiza).

El rango de densidades se encuentra entre 17 y 25 kg/m<sup>3</sup>. Análogamente a la salinidad aparece una diferencia notable entre los valores de las zonas azuladas y las rojizas, correspondientes a las zonas interiores del estuario y las colindantes a la zona exterior, en contacto con el mar abierto.

Ambas variables presentan valores similares en las diferentes profundidades, mostrando la correspondencia esperada con los perfiles de CTD analizados en el apartado anterior (Figura 25 y Figura 26).

Al igual que en el análisis de las temperaturas, vemos una diferenciación de las aguas en dos zonas, producidas por la corriente lateral que se produce en la Bahía; característica de un estuario bien mezclado. Las aguas más saladas y densas penetran desde el mar por el oeste, y circulan por estuario hacia su interior, subiendo su temperatura y perdiendo su salinidad hasta que vuelven a salir a mar abierto.

Otro importante resultado que debemos resaltar tras la observación de estos gráficos es el hecho de que la densidad es controlada por la salinidad, y no por la temperatura; este hecho implica una variación espacial de las salinidades muy importante.

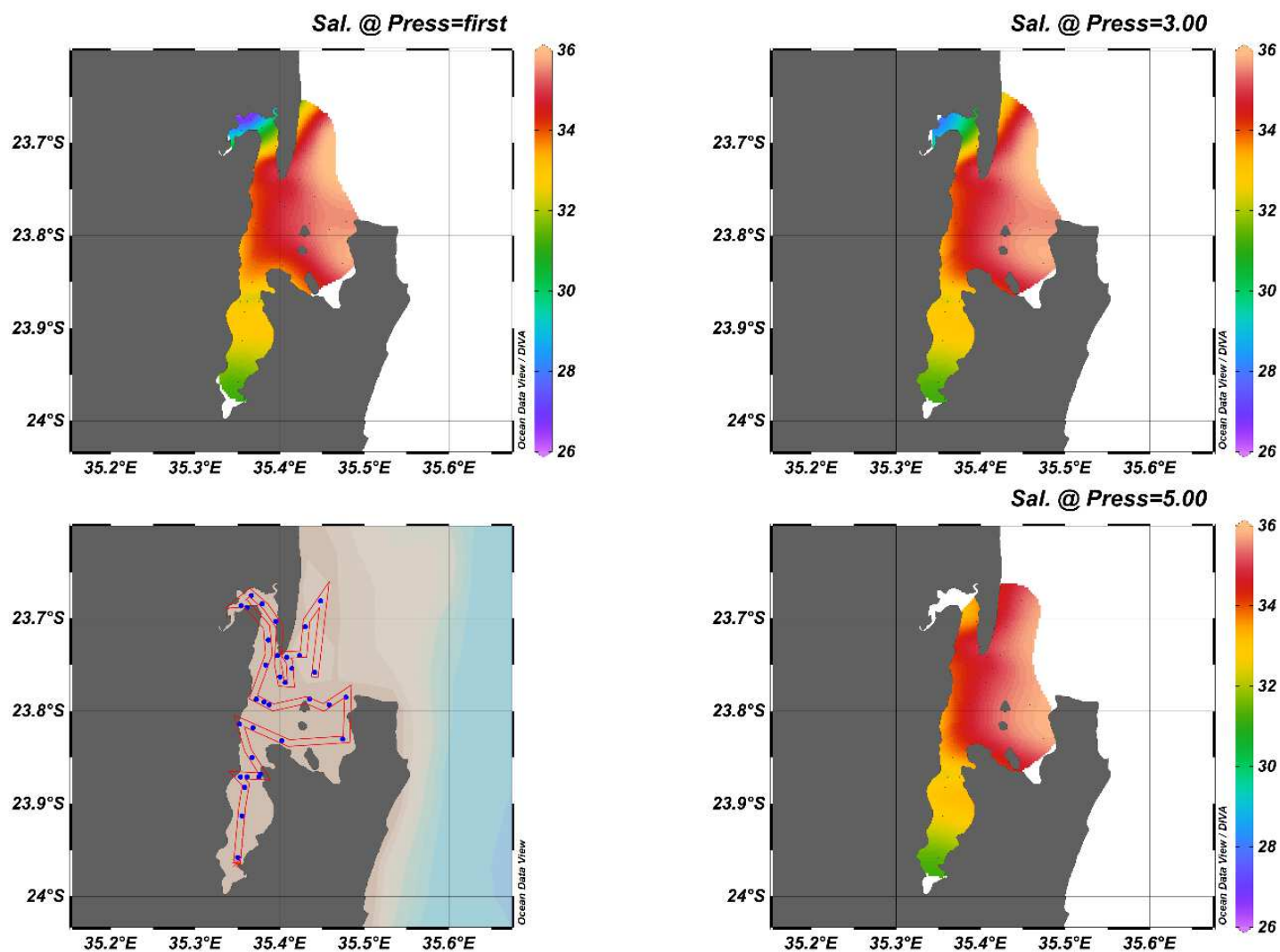


Figura 29. A) Salinidad en la superficie. B) Salinidad a 3m de profundidad. C) Salinidad a 5m de profundidad.

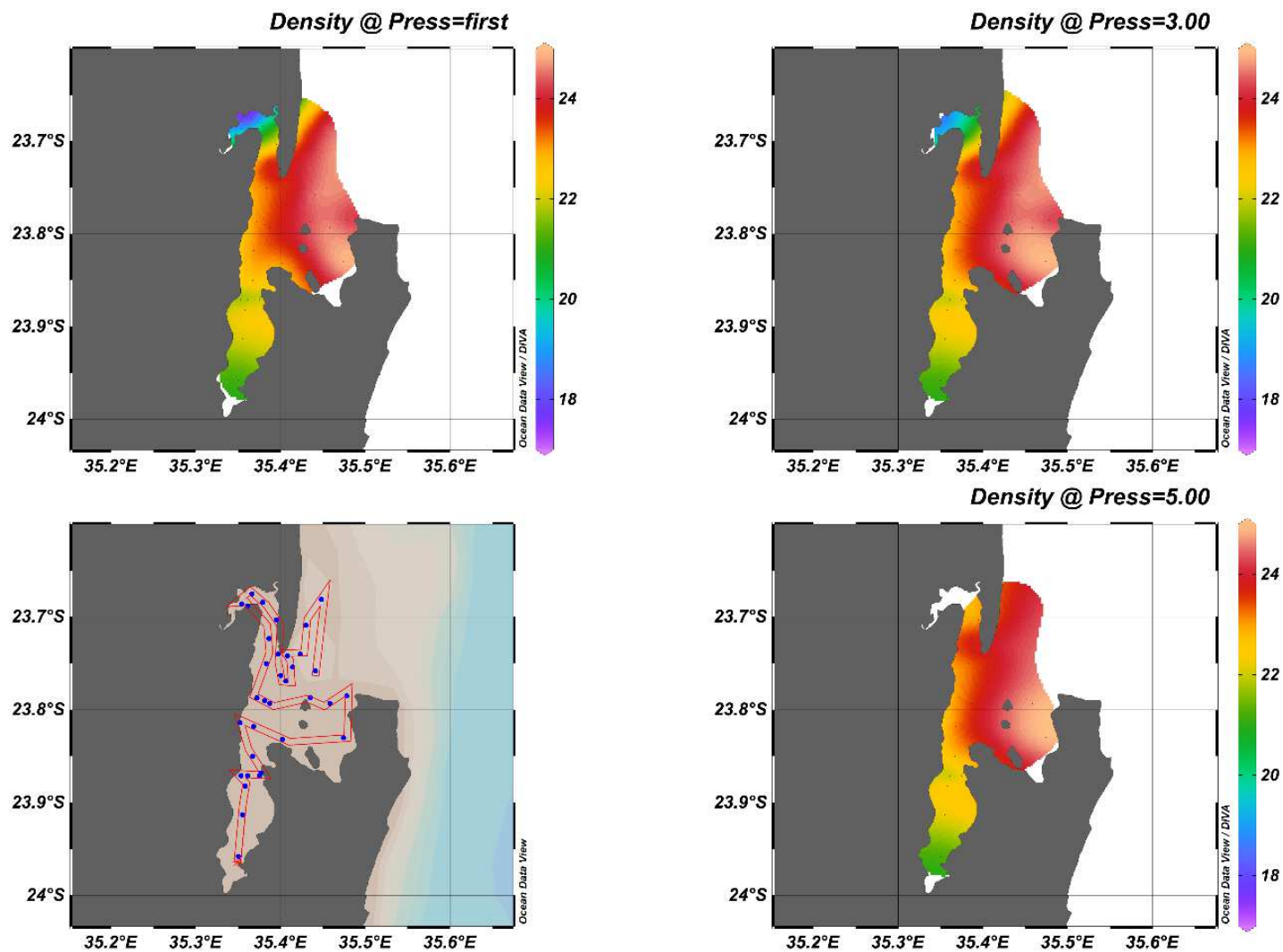


Figura 30. A) Densidad en la superficie. B) Densidad a 3m de profundidad. C) Densidad a 5m de profundidad.

### 5.2.2. Secciones verticales

Para la elaboración de las siguientes secciones verticales, se han tenido en cuenta la totalidad de las mediciones CTD realizadas durante la campaña de julio de 2017. Es por esta razón que se obtiene una situación media en cuanto a fases de marea, que debemos tener en cuenta para el posterior análisis de los datos obtenidos. Al igual que en apartados anteriores, el hecho de prever un estuario de mezcla completa permite que la media de valores de las fases marea sea una aproximación aceptable. Es por esto que en las próximas secciones no se dividirán los resultados en función de la marea existente.

Por otro lado, cabe resaltar que el objetivo de las siguientes secciones verticales es, precisamente, la zonificación en el interior de la Bahía de Inhambane. Es por esto que la división de secciones se realiza por transectos y no por variación temporal. Así, cada sección representa una zona del estuario, formada por mediciones realizadas en diferentes jornadas.

La falta de una mayor cantidad de datos y mediciones, no permite realizar secciones más completas o específicas. A pesar de ello, queda de manifiesto la importancia de realizar secciones verticales de las diferentes zonas, en función de la temporalidad y del tipo de marea existente (flood/ebb), si en un futuro se realizaran más campañas de campo en la Bahía de Inhambane.

En cuanto a la correspondencia de los perfiles, representados por perfiles verticales incluidos de los mapas 2D, con los puntos del mapa, aparece representada por la latitud de dicho punto o estación. La dirección de navegación carece de relevancia al no corresponderse a transectos por jornadas, si no por zonas.

- Canal Lateral o de Maxixe

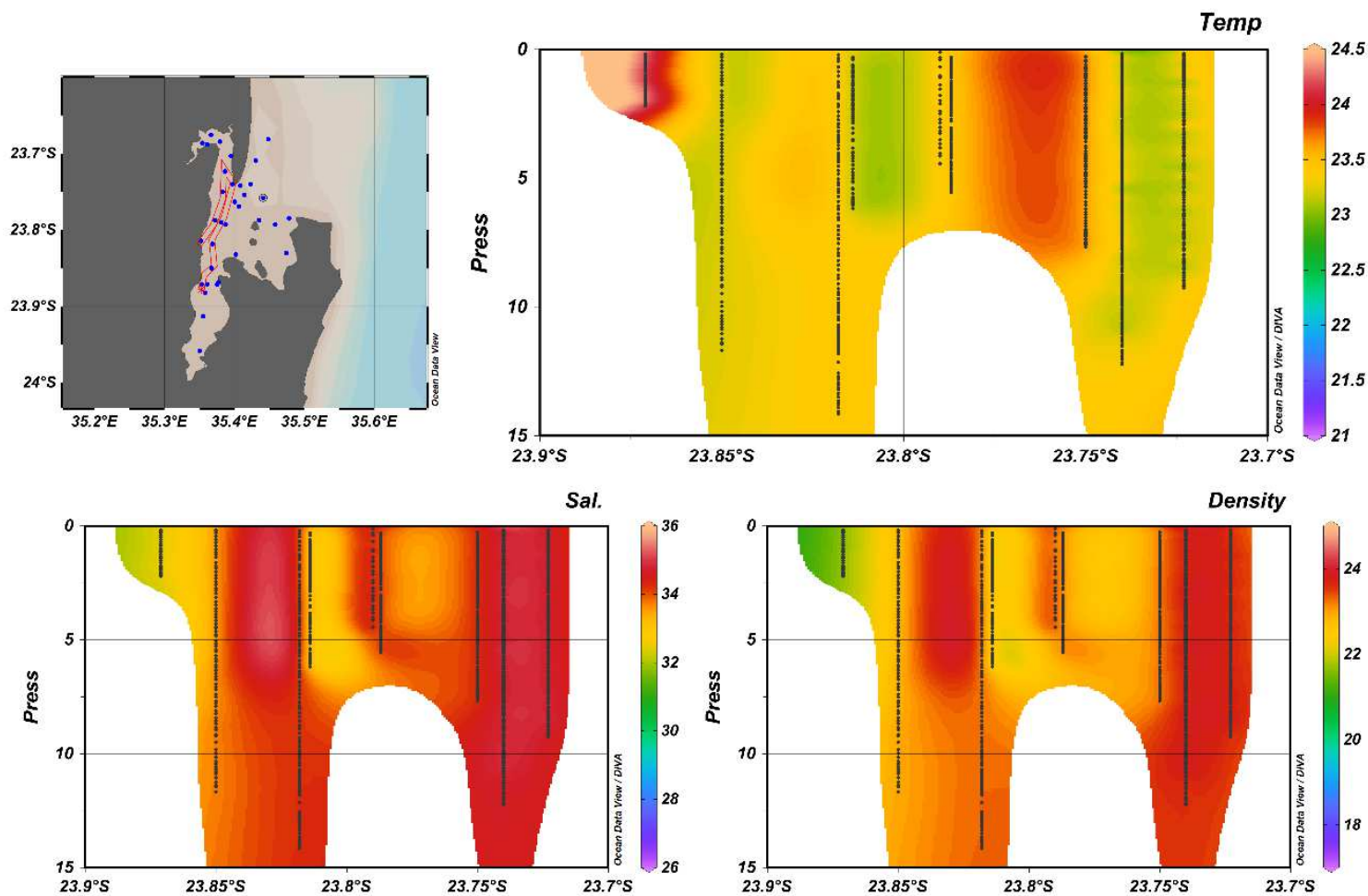


Figura 31. Secciones verticales Canal Lateral: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad.

- Canal Central

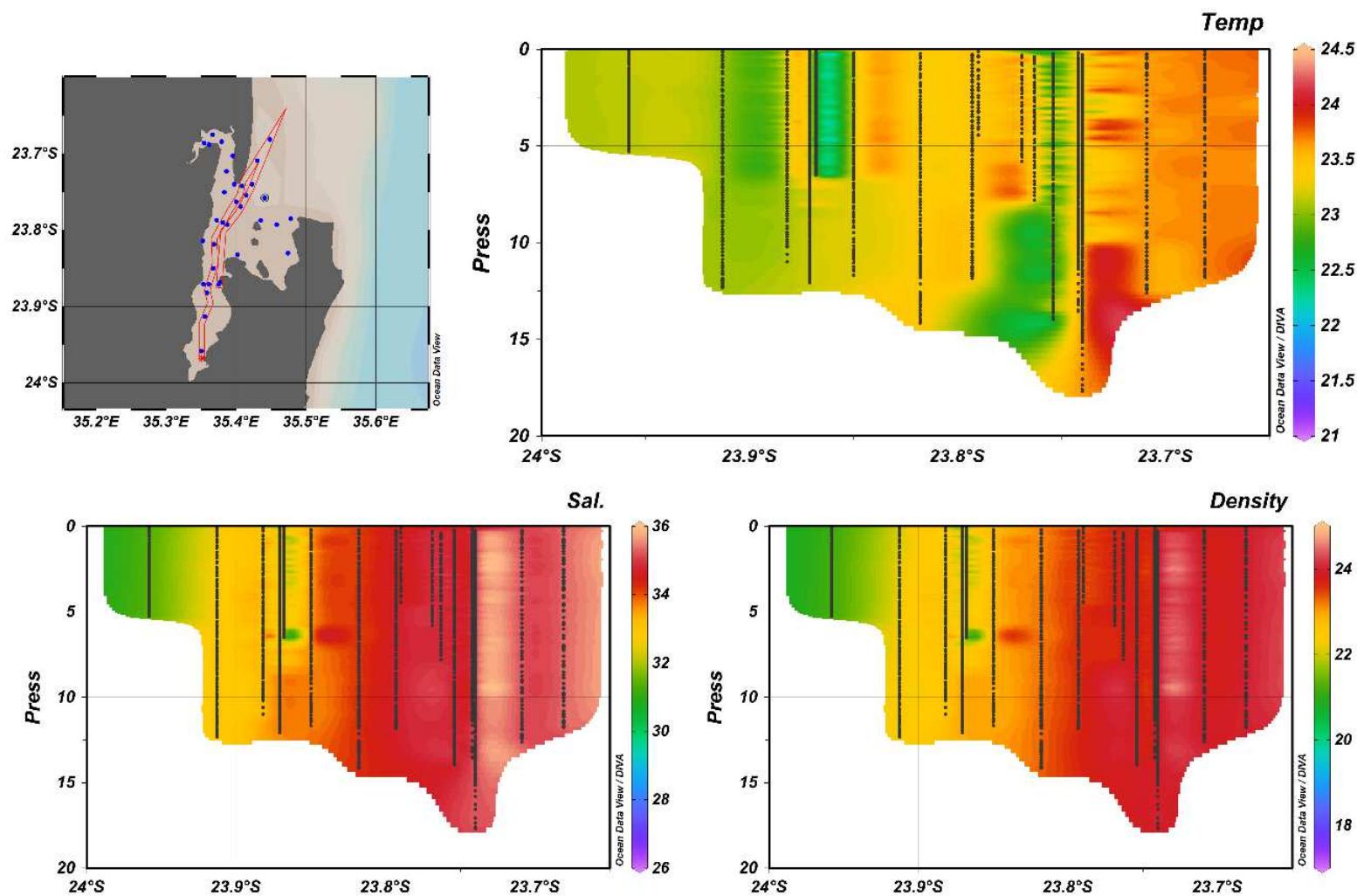


Figura 32. Secciones verticales Canal Central: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad.



- Estuario de Morrumbene

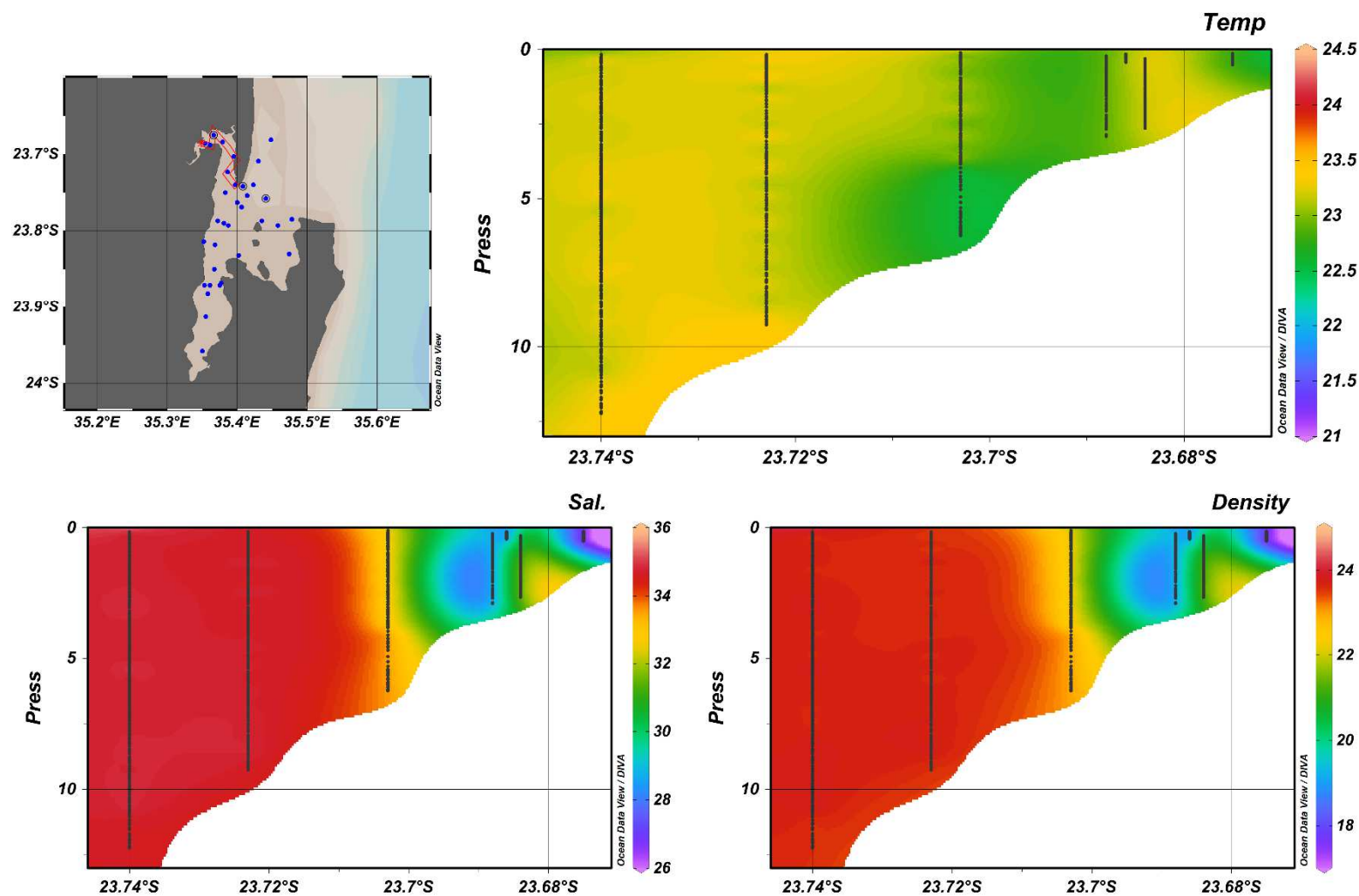


Figura 33. Secciones verticales Morrumbene: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad.



- Canal da Ilha

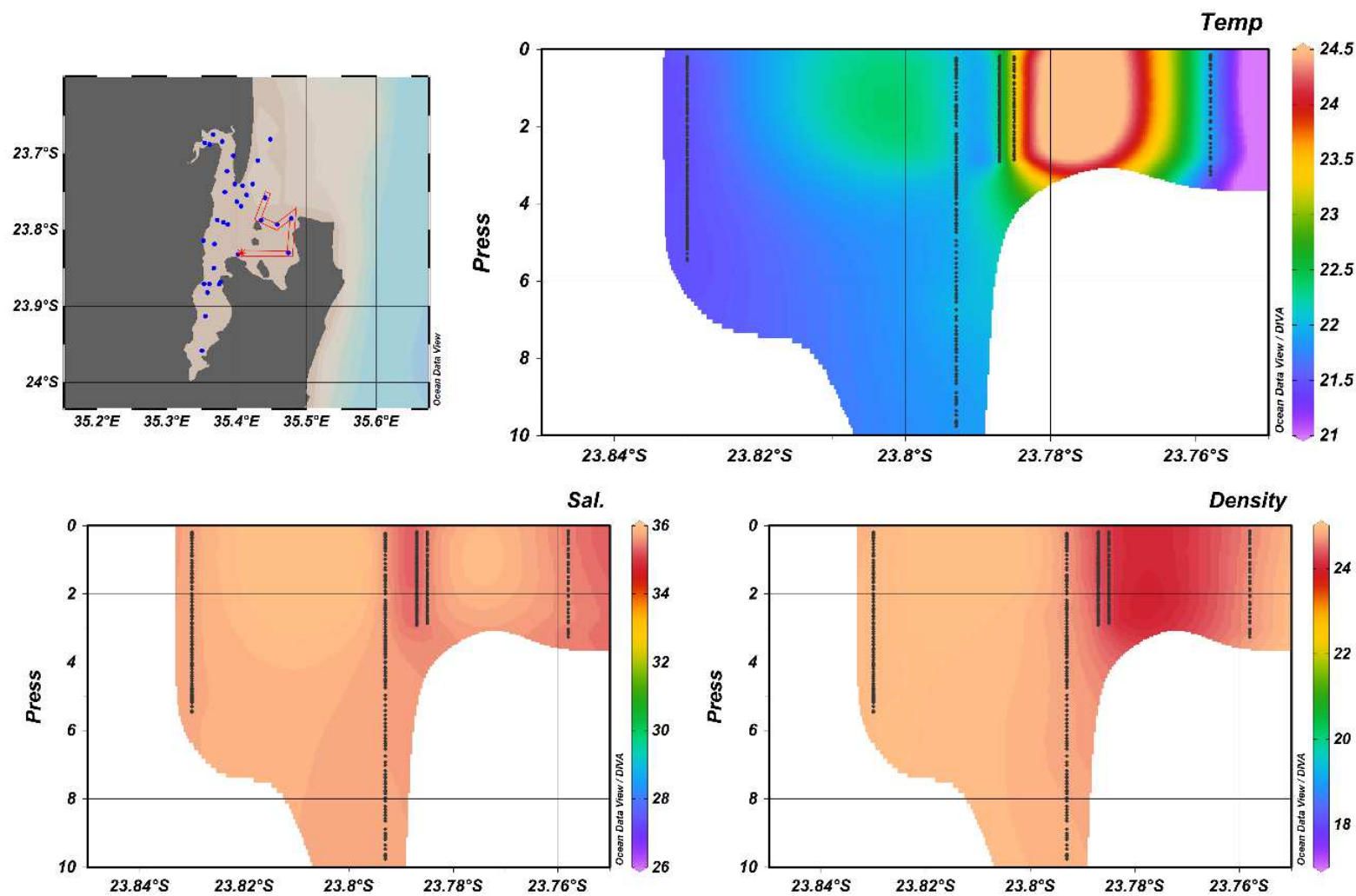


Figura 34. Secciones verticales Canal da Ilha: A) Temperatura; B) Salinidad; C) Densidad.

Las secciones verticales anteriores refuerzan la idea de un estuario completamente mezclado, puesto que los perfiles son homogéneos en la profundidad.

La única excepción a esta caracterización de estuario bien mezclado la encontramos en *Morrumbene*, donde se produce cierta estratificación. Podemos justificar dicho comportamiento por un lado debido a la pequeña profundidad existente (de aproximadamente 3 metros de media); y por otro lado, a su condición de pequeño estuario interior de la propia Bahía de Inhambane donde existe una gran aportación de agua dulce, creando una zona donde la marea no posee la fuerza necesaria para mezclar el agua. Los perfiles de menor latitud (a la izquierda en la Figura 33), marcan claramente el final de la influencia del agua dulce en el estuario, que finaliza en la zona de Linga-Linga, con características similares a las de mar abierto.

En cuanto a la diferencias por transectos, podemos ver como las figuras anteriores (Figura 31 - Figura 34) nos muestran aguas relativamente diferentes dependiendo de cada uno de los tramos analizados.

En general, el *Canal Lateral* posee aguas cálidas sobre los 23 °C, siendo algo mayores cerca de *Ponta da Linga-Linga*. La densidad y la salinidad presentan un cierto gradiente de valores, pero predominan los mayores, alrededor de 35 PSU y 25 kg/m<sup>3</sup>.

El *Canal Central*, que abarca la mayor extensión respecto a latitudes, resulta una media de los valores del estuario. Posee aguas en torno a los 23 °C de temperatura; y salinidades y densidades más bajas en el interior o inicio del canal (31 PSU y 21 kg/m<sup>3</sup>), que van aumentando sus valores conforme se acercan a mar abierto (36 PSU y 24 kg/m<sup>3</sup>).

Es en estas secciones referentes al *Canal Central* donde encontramos la zona máxima de mezcla. En los puntos de menor latitud ya encontramos propiedades similares a las del mar abierto, de temperaturas entre los 21 y los 25 °C; y salinidades entre los 34.6 y 35.5 PSU (Cândida S., Ruby J. & Dove V., 2002).

En el estuario de *Morrumbene*, el aporte de agua dulce presente en la zona hace que sus aguas sean menos salinas y, en consecuencia, menos densas. Este hecho hace que esta zona presente los valores más bajos de estas dos variables respecto al resto de la totalidad de la Bahía de Inhambane (26 PSU y 16 kg/m<sup>3</sup>). La temperatura de sus aguas está algo por debajo de la media, sobre los de 22.5 °C.

Por último, la zona del *Canal da Ilha*, en el ensanchamiento de la Bahía, presenta las aguas con temperaturas más bajas. Poseen una media de 22 °C, un grado menos que las demás zonas. En cuanto a la salinidad y la densidad, el hecho de que este transecto esté próximo a mar abierto hace que tengan valores superiores al resto de aguas, con valores aproximados de 35 PSU y 24 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Estos resultados nos permiten asumir que las descargas continentales de las aguas no son despreciables, puesto que influyen de manera significativa en las del estuario.

### 5.3. Variabilidad temporal

En el presente apartado podremos ver un análisis temporal, en relación a la diferencia horaria y el tipo de marea existente (Flood – Ebb), de puntos de CTD con referencia fija en la Bahía. Es decir, una comparativa de mediciones con posición fija.

#### 5.3.1. Punto de referencia

Posicionada en el pantalán o embarcadero de Inhambane, se realizó una jornada de medidas de CTD en una estación fija. Estas mediciones se llevaron a cabo durante 12h, un ciclo completo de marea, el día 18/07. Como se ha adelantado en este mismo apartado, el objetivo de estas mediciones es el análisis temporal de las mismas.

Así, procederemos a ver los gráficos de perfiles obtenidos a través del programa ODV.

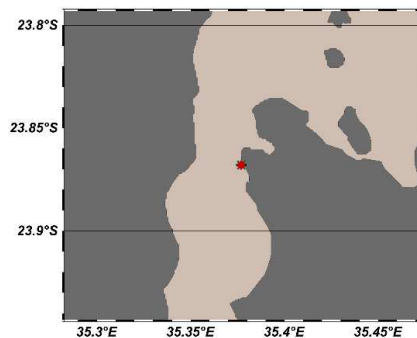


Figura 35. Posición del punto de referencia (R) en el pantalán.

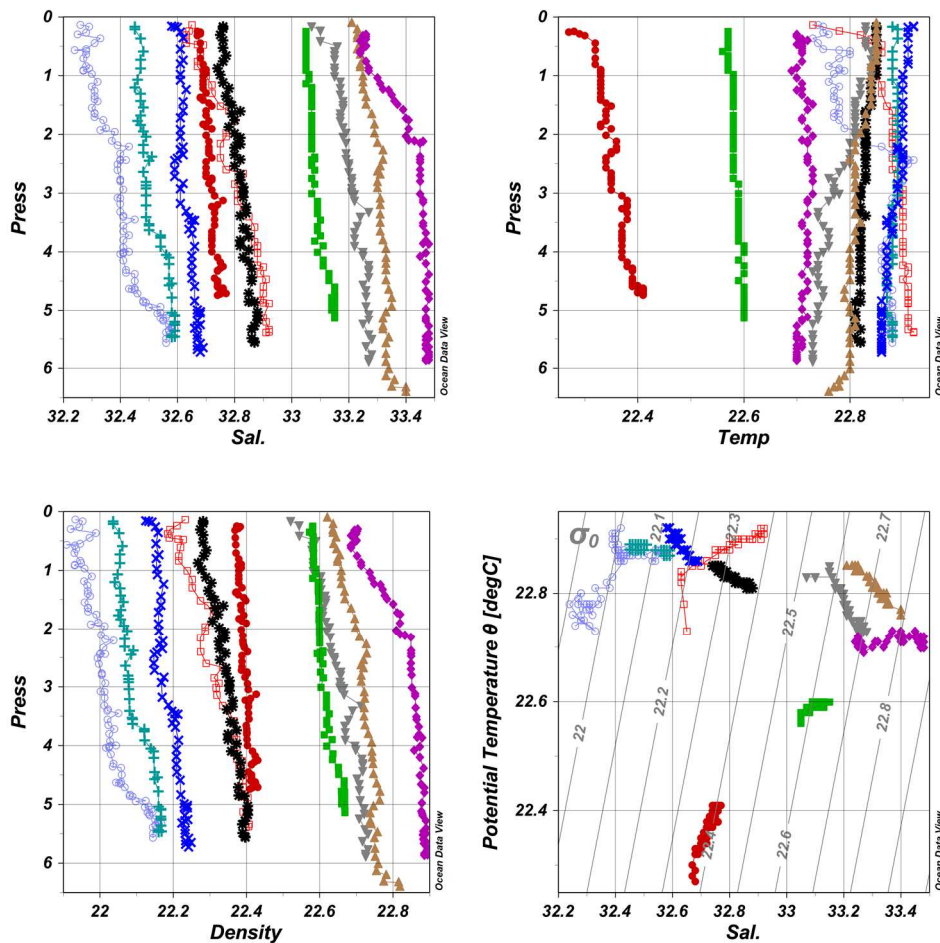


Figura 36. Perfiles del punto de referencia (R).

| <i>Representación en el plano</i> | <i>Estación</i> | <i>Tipo marea</i> | <i>Hora GMT [h]</i> |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| Puntos rojos                      | R0              | Flood             | 06:09               |
| Cuadrados verdes                  | R1              | Flood             | 07:12               |
| Puntos morados                    | R3              | Flood             | 09:06               |
| Triángulos marrones               | R5              | Ebb               | 11:04               |
| Triángulos grises                 | R6              | Ebb               | 12:04               |
| Equis negras                      | R7              | Ebb               | 13:04               |
| Equis azules                      | R8              | Ebb               | 14:03               |
| Cruces azuladas                   | R9              | Ebb               | 15:05               |
| Círculos azules                   | R10             | Ebb               | 16:05               |
| Cuadrados rojos                   | R11             | Flood             | 17:01               |

*Tabla 3. Datos de los perfiles de la estación fija de referencia (R).*

Podemos observar cómo las medidas poseen unos perfiles de salinidad y densidad similares. R2 y R4 han sido eliminados de los perfiles durante la depuración de datos. La salinidad varía entre los 32.2 y los 33.5 PSU; la densidad lo hace entre los 21.9 y los 23 kg/m<sup>3</sup>. Los perfiles representados en los gráficos anteriores, de menor a mayor salinidad y densidad, corresponden a los puntos R10, R9, R8, R11, R7, R0, R1, R6, R5 y R3 respectivamente.

En cuanto a la temperatura, todos los perfiles son similares, variando sólo desde los 22.3 a los 22.9 °C, es decir, menos de un grado de diferencia. La sucesión de puntos en el gráfico, de menor a mayor temperatura es R0, R1, R3, R6, R10, R5, R7, R8, R9 y R11.

Como tendencia general, podemos observar que no se produce estratificación en el estuario, puesto que todos los perfiles son verticales rectos, sin curvas significativas que la indiquen.

### 5.3.2. Otros puntos fijos

Cómo hemos podido ver, existen ciertos puntos (o estaciones siguiendo la nomenclatura del ODV) repetidos durante las diferentes jornadas de la campaña. Esto ha permitido obtener más de un perfil CTD para una misma posición, permitiendo la comparativa del mismo en función de la hora de medición y el tipo de marea presente cuando se realizaba. Algunas de las estaciones y sus resultados se presentan a continuación.

Como observamos en los perfiles de la siguiente Figura 37, los dos perfiles iniciales C01I y C02I poseen perfiles similares en todas las variables, pese a que se encuentran en diferente rango de marea. Esto es debido, probablemente a que el perfil de C01I fue tomado en el cambio de vaciante (Ebb) a llenante (Flood), y dado que el cambio no es instantáneo, las condiciones de ambas son similares. Lo mismo sucede con los perfiles finales C01F y C02F, donde sólo encontramos una pequeña variación de temperatura entre perfiles.

Entre medidas iniciales (C01I, C02I) y finales (C01F, C02F) pasa todo un ciclo de mareas (Flood – Ebb – Flood), lo que explicaría la diferencia significativa entre perfiles.

- Estación C0

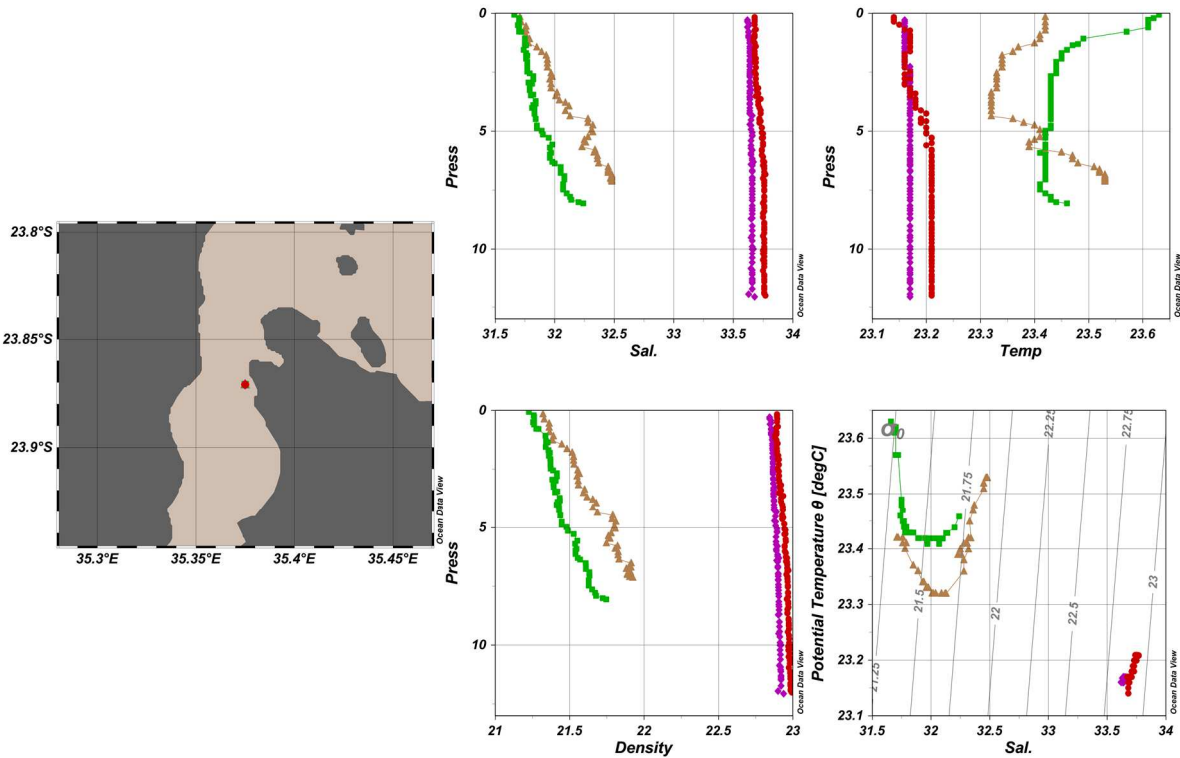


Figura 37. Perfiles de la estación fija C0.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos rojos               | C01I     | Ebb        | 05:21        | 13/07/17         |
| Cuadrados verdes           | C01F     | Flood      | 11:51        | 13/07/17         |
| Puntos morados             | C02I     | Flood      | 05:41        | 14/07/17         |
| Triángulos marrones        | C02F     | Flood      | 12:14        | 14/07/17         |

Tabla 4. Datos de los perfiles de la estación fija C0.

- Estación C8

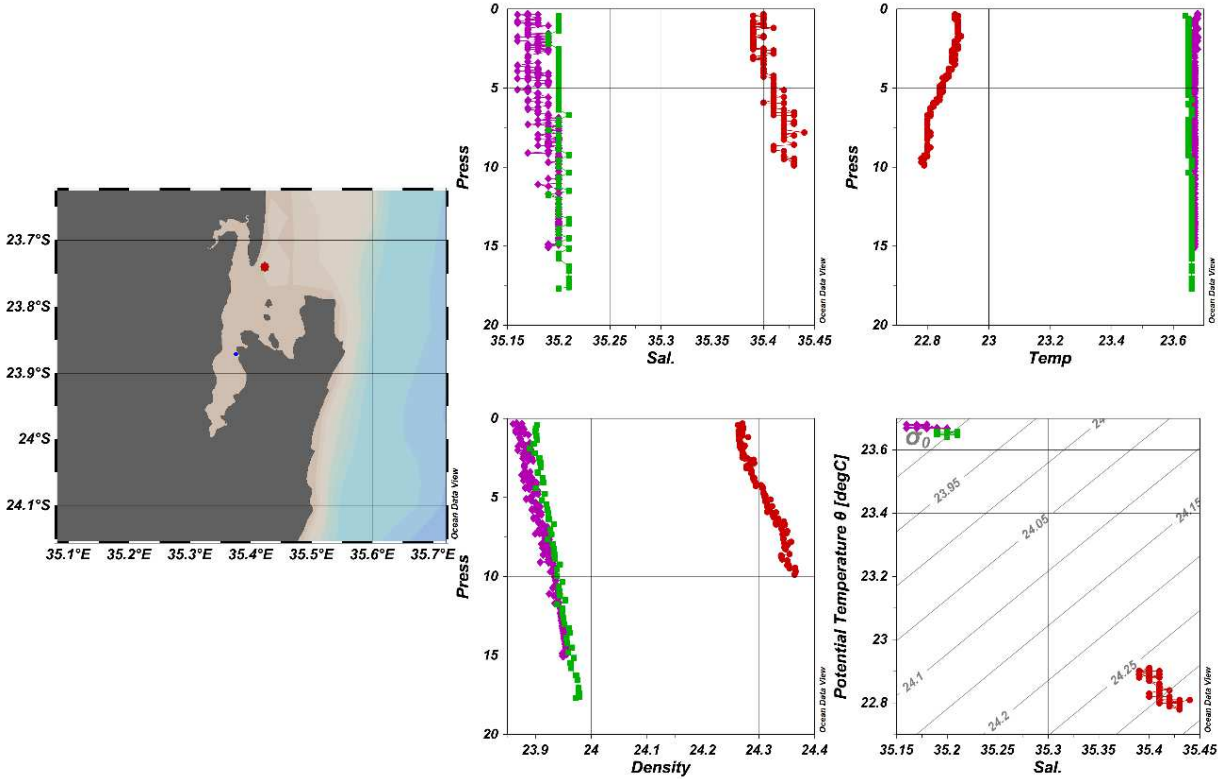


Figura 38. Perfiles de la estación fija C8.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos morados             | C8.1     | Ebb        | 08:57        | 13/07/17         |
| Cuadrados verdes           | C8.2     | Ebb        | 09:41        | 14/07/17         |
| Puntos rojos               | C8.3     | Flood      | 11:07        | 19/07/17         |

Tabla 5. Datos de los perfiles de la estación fija C8.

Análogamente al caso anterior, la diferencia entre perfiles, se da en consonancia con el tipo de marea y la hora. En marea llenante (C8.3) todas las variables registran valores mayores a los obtenidos con marea vaciante (C8.1, C8.2).

Siguiendo el mismo patrón que los anteriores, los resultados de la comparativa de las estaciones H1, H5, H6, M5, M6 y M7 aparecen en el anejo B del presente trabajo.

### 5.3.3. Variaciones de nivel de marea

Finalmente, dentro de este apartado de mediciones CTD con posición fija, se procederá al análisis de las variaciones de nivel de marea experimentadas en el interior de la Bahía.

Para analizar el rango o la carrera de marea, sólo podemos utilizar las mediciones de posición fija que cubran un rango mínimo de 6 horas que es el tiempo aproximado entre una bajamar y una pleamar. Es por esto que sólo se tomarán los valores de las estaciones R, con duración de 12h o medio ciclo de marea, y la C0, de la que se poseen dos registros de 6h cada uno en días diferentes.

En la siguiente tabla se muestran las profundidades máximas alcanzadas en cada medición CTD, el tipo de marea presente durante la misma medición, la hora y la máxima variación alcanzada en la estación fija. Como ya se ha nombrado, esta variación se obtiene para cada 6 horas, la diferencia horaria entre la pleamar y la bajamar de la marea.

Debemos tener en cuenta la fase de marea presente en los días de medición: mareas muertas durante las mediciones de las estaciones C0; mareas vivas para los valores de la estación R. Así, siguiendo la *Tabela de mares de Inhambane*, podemos esperar unos valores de variación máxima de 1.27m para la estación R y unos 2.37m en las estaciones C0.

| Estación | Referencia | Profundidad máx. | Hora GMT [h] | Marea | Máx. variación |
|----------|------------|------------------|--------------|-------|----------------|
| R        | R0         | 4.74             | 06:09        | Flood | 1.78           |
|          | R1         | 5.14             | 07:12        | Flood |                |
|          | R3         | 5.87             | 09:06        | Flood |                |
|          | R5         | 6.41             | 11:04        | Ebb   |                |
|          | R6         | 5.88             | 12:04        | Ebb   | 1.02           |
|          | R7         | 5.56             | 13:04        | Ebb   |                |
|          | R8         | 5.73             | 14:03        | Ebb   |                |
|          | R9         | 5.47             | 15:05        | Ebb   |                |
|          | R10        | 5.57             | 16:05        | Ebb   |                |
|          | R11        | 5.39             | 17:01        | Flood |                |
| C01      | C01I       | 12.02            | 05:21        | Ebb   | 3.96           |
|          | C01F       | 8.06             | 11:51        | Flood |                |
| C02      | C02I       | 12.07            | 05:41        | Ebb   | 4.93           |
|          | C02F       | 7.14             | 12:14        | Flood |                |

Tabla 6. Variaciones del nivel de marea.

Como podemos observar, el rango de variación de marea va desde un valor mínimo de 1.02m, en el punto R, hasta un máximo de 4.93m en la estación C02. Resaltar que, por ser la profundidad máxima, el valor 6.41m de la medición R5 se ha usado para el cálculo de la variación de las dos mitades de ciclo de marea (1.78 y 1.02m).



Estos valores concuerdan con las fases de mareas presentes, presentando una variación superior de nivel durante las mareas vivas (C0), con una media de 4.44m, e inferior en muertas (R) con una variación media de 1.4m.

La variación obtenida en mareas muertas, es similar a los 1.27m esperados según la tabla de mareas. Sin embargo, la variación de las mediciones en mareas vivas es superior a la teórica de 2.37m, con una diferencia de unos 2m. Este hecho puede deberse a que las mediciones de C0 están limitadas a 6h, por lo que no cubren todo el ciclo de mareas.

A continuación, se presenta una tabla resumiendo los resultados obtenidos:

| <i>Tipo de marea</i> | <i>Variación nivel de marea teórica [m]</i> | <i>Variación nivel de marea experimental [m]</i> | <i>Variación nivel de marea promedio [m]</i> |
|----------------------|---|--|--|
| Mareas vivas         | 2.37  | 4.44   | 3.41   |
| Mareas muertas       | 1.27  | 1.4  | 1.34   |
| Marea promedio       | 1.82  | 2.92   | 2.37   |

*Tabla 7. Variaciones de nivel de marea teórica, experimental y medias.*

Finalmente, tomando la totalidad de las variaciones, el valor promedio en una situación media de marea, en el interior de la Bahía resulta ser de 2.37m. El valor teórico esperado es de 1.82 metros.

Como información complementaria de posible interés, el resto de profundidades máximas alcanzadas por la totalidad de mediciones CTD se encuentran en el Anejo C del presente texto.

#### 5.4. Prisma de marea

El prisma de marea se define como el volumen de agua intercambiado entre un estuario y el mar abierto durante un ciclo de marea completo, distinguiendo el agua entrante/saliente del agua en el interior del estuario (Real Academia de la Ingeniería, 2018). Dicho prisma es un indicador de la dinámica mareal, y debe calcularse teniendo en cuenta la carrera de marea correspondiente a una marea viva mensual.

Para realizar el cálculo de volúmenes, se debe establecer la diferencia entre el nivel de las respectivas amplitudes de marea, generando el volumen de agua para cada situación (pleamar, bajamar). A partir de estos resultados podemos obtener el prisma de marea, resultado de la resta del volumen de agua presente en el río en pleamar menos el volumen de agua en bajamar.

Dicho volumen se obtendrá multiplicando el nivel de marea por la superficie de la bahía, que es de 340 km<sup>2</sup>.

A pesar de que existen softwares con métodos como el de Ketchum o el de Simpson capaces de realizar este cálculo, debido a la falta de datos experimentales (sólo poseemos mediciones de un ciclo de marea completo y es durante la fase de mareas muertas, el día 18.07 en el punto de referencia R), se ha decidido realizar una aproximación sencilla a partir de los datos teóricos. Por lo tanto, el objetivo es hallar un resultado que nos permita establecer una orden de magnitud del volumen de agua intercambiada y su tiempo de permanencia.

Todos estos datos son presentados en la tabla que aparece a continuación. Como información adicional, y en la misma tabla, se presentarán los resultados experimentales para su comparación a los teóricos esperados.

| Tipo de marea  | Fase de marea | DATOS TEÓRICOS               |                                   | DATOS EXPERIMENTALES         |                                   |
|----------------|---------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                |               | variación nivel de marea [m] | volumen de agua [m <sup>3</sup> ] | variación nivel de marea [m] | volumen de agua [m <sup>3</sup> ] |
| MAREAS VIVAS   | Pleamar       | 2.28                         | $7.75 \cdot 10^8$                 | 4.44                         | $1.51 \cdot 10^9$                 |
|                | Bajamar       | 2.38                         | $8.09 \cdot 10^8$                 | Sin datos                    | -                                 |
| MAREAS MUERTAS | Pleamar       | 1.18                         | $4.01 \cdot 10^8$                 | 1.78                         | $6.05 \cdot 10^8$                 |
|                | Bajamar       | 1.27                         | $4.32 \cdot 10^8$                 | 1.02                         | $3.47 \cdot 10^8$                 |

Tabla 8. Datos para el cálculo del prisma de marea.

Finalmente, restando los dos valores obtenemos el valor del prisma de marea o el volumen de agua intercambiado en cada ciclo de marea:

| Tipo de marea  | Prisma de marea teórico [m <sup>3</sup> ] | Prisma de marea experimental [m <sup>3</sup> ] |
|----------------|---|--|
| MAREAS VIVAS   | $3.40 \cdot 10^7$                         | -  |
| MAREAS MUERTAS | $3.06 \cdot 10^7$                         | $2.58 \cdot 10^8$                              |

Tabla 9. Resultados del prisma de marea.

Así, vemos como el volumen experimental es superior al teórico esperado. Y, como era de esperar, el prisma correspondiente a mareas vivas,  $3.40 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>, es ligeramente mayor al volumen de agua intercambiado con el mar en mareas muertas,  $3.06 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>.

#### 5.4.1. Tiempo de permanencia

El tiempo de permanencia, dentro del ciclo hidrológico, es el tiempo medio que una molécula de agua pasará en una reserva de agua. Es decir, nos permite hallar el tiempo de renovación del agua del estuario, y se estima dividiendo el volumen total del estuario por la tasa a la cual el agua entra o sale del mismo (prisma de marea).

En primer lugar, calculamos la tasa del agua que se intercambia en una hora, que resulta ser de  $2.83 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/h en mareas vivas y de  $2.55 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/h en muertas.

La profundidad media de la marea, fase de media de mareas cuyo cálculo detallado se muestra en el anejo C, es de 7.76 m. Por tanto, multiplicando está profundidad por la superficie del estuario, obtenemos el volumen total del agua, que es de unos  $2.64 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>.

Por último, calculamos el tiempo de permanencia:

- En mareas vivas:

$$\text{Tiempo de permanencia} = \frac{2.64 \cdot 10^9}{2.83 \cdot 10^6} = 931 \text{ h} \approx 39 \text{ días}$$

- En mareas muertas:

$$\text{Tiempo de permanencia} = \frac{2.64 \cdot 10^9}{2.55 \cdot 10^6} = 1035 \text{ h} \approx 43 \text{ días}$$

Finalmente, estableceremos un tiempo de permanencia promedio de 41 días. Debemos tener en cuenta que estos resultados se basan en las mediciones teóricas y que son sólo una muestra del orden de magnitud de los valores presentes en la Bahía de Inhambane.

### 5.5. Resultados de las trayectorias de las boyas lagrangianas

A continuación, se pueden ver los diferentes puntos de inicio y final del recorrido de cada boya por día de campaña, trazadas por el programa “Traccar Manager”. La simbología de las imágenes y los colores con los cuales están representadas las trayectorias en las figuras correspondientes (Figura 39 - Figura 51), se presentan en la siguiente tabla:

| <i>Representación en el plano</i> | <i>Significado</i>       |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Punto verde                       | Inicio de trayectoria    |
| Punto rojo                        | Final de trayectoria     |
| Punto amarillo                    | Punto relevante          |
| Flecha azul                       | Dirección de trayectoria |
| Trayectoria azul                  | Boya 1                   |
| Trayectoria rosa                  | Boya 2                   |
| Trayectoria morada                | Boya 3                   |

*Tabla 10. Trayectorias de las boyas lagrangianas.*

Junto a dichas imágenes, se presentan los gráficos velocidad – tiempo registrados por cada boya y la descripción del recorrido, permitiendo ver la evolución de toda la trayectoria.

La línea azul resaltada en dichos gráficos es el resultado de realizar una línea de tendencia de media móvil con el programa Excel.

Los puntos relevantes como cambios de dirección o de velocidad importantes aparecen, tanto en las imágenes como los gráficos, con un punto amarillo correlacionado en posición y tiempo.

La primera jornada de campaña de boyas lagrangianas sirvió como prueba inicial del funcionamiento de las boyas fabricadas y una primera aproximación de órdenes de magnitud esperados en los siguientes días. En ella, la Boya 1 fue a la deriva por el *Canal Central*, coincidiendo con el cambio de marea (Flood – Ebb), lo que supuso un cambio brusco en su dirección. Con la marea vaciante comenzó a alejarse hacia el *Canal Lateral*, hacia afuera de la Bahía, reflejando la fuerza de la intensidad de marea existente.



*Figura 39. Trayectoria boyas lagrangianas día 19/07.*

En esta primera trayectoria podemos volver a observar claramente la circulación lateral, en forma de “V”, que se desarrolla en un estuario bien mezclado. El agua más salada penetra con la marea llenante desde la zona del *Canal da Ilha* (primer tramo de la trayectoria) y, vuelve hacia mar abierto por el *Canal Lateral* con la marea vaciante (segundo tramo de la trayectoria).

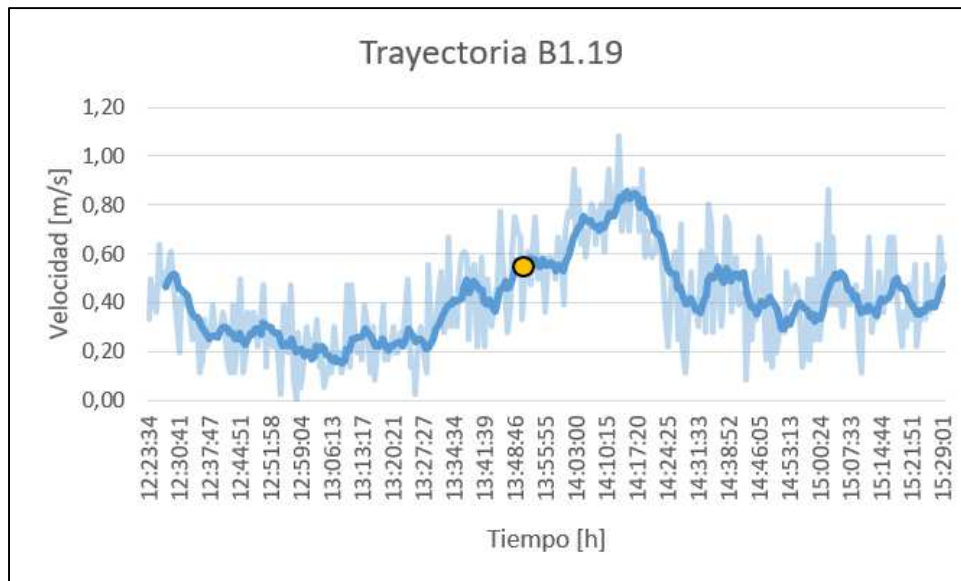


Figura 40. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.19.

El día 20/07 se procedió a la suelta de las tres boyas desde la *Ponta da Linga-Linga*, con el objetivo principal de observar si éstas saldrían hacia mar abierto o la intensidad de la marea llenante era suficiente como para arrastrarlas hacia el interior de la Bahía, hecho que sucedió como puede apreciarse en la Figura 41.

Dicho esto, otro de los objetivos fue ver la importancia de los distintos canales; vistas las trayectorias se observa como ninguna de ellas deriva a través del *Canal Central*, como se podría prever dado su mayor tamaño. La Boya 1 fue arrastrada por el *Canal da Ilha*, y las Boyas 2 y 3 hacia el *Canal Lateral* o de *Maxixe*.

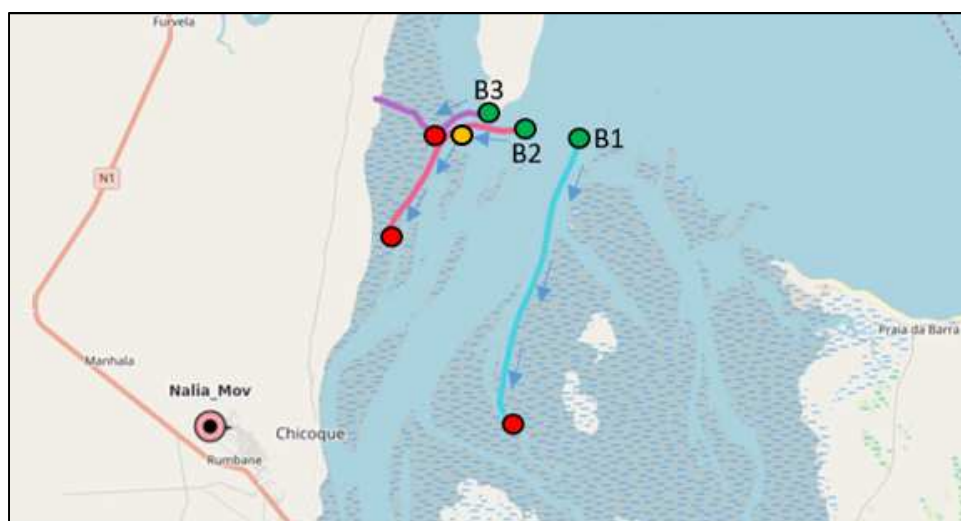


Figura 41. Trayectoria boyas lagrangianas día 20/07.

En la figura anterior vemos como la trayectoria de la Boya 3 aparece cortada. Este hecho es debido a que donde se referencia su recogida, fue interceptada por un pescador que la sacó de su ruta y la llevó a la orilla.

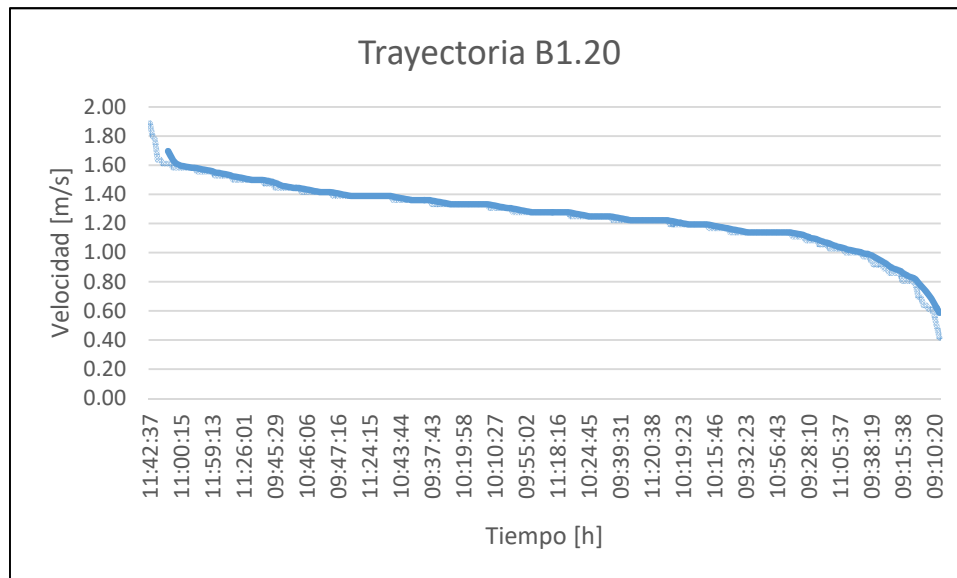


Figura 42. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.20.

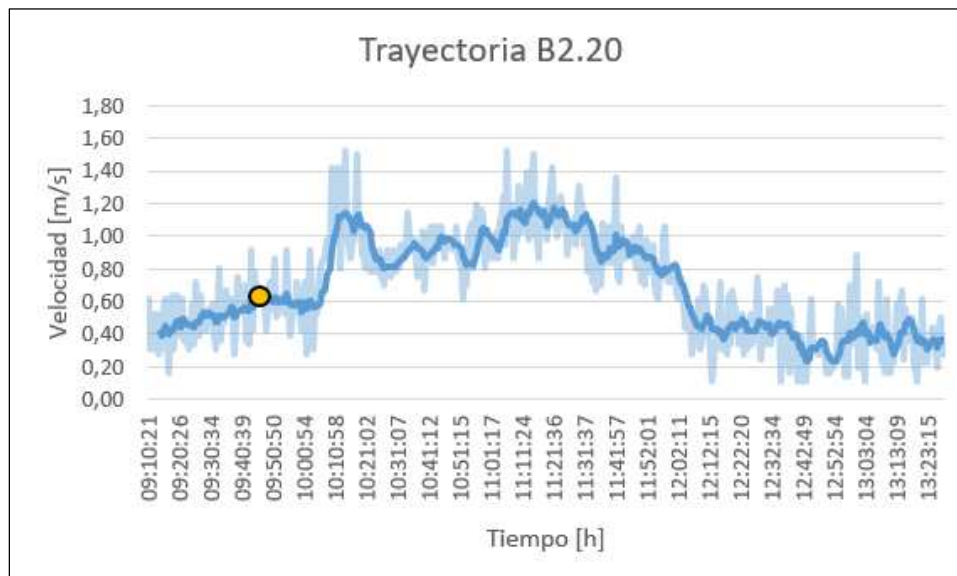


Figura 43. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B2.20.

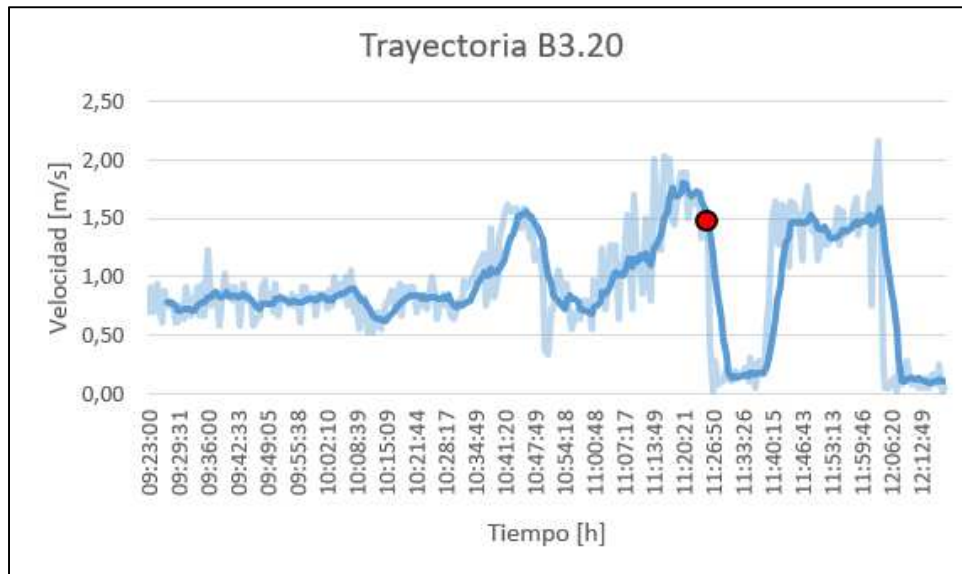


Figura 44. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B3.20.

En cuanto a la tercera jornada de la campaña, en la que se dejaron a la deriva en el centro de la Bahía dos de las boyas, se observó cómo se desplazaron hacia el interior de la misma siguiendo el *Canal Central*; ignorando el *Canal da Ilha*, que no tuvo fuerza suficiente para arrastrar hacia él a ninguna de las boyas.

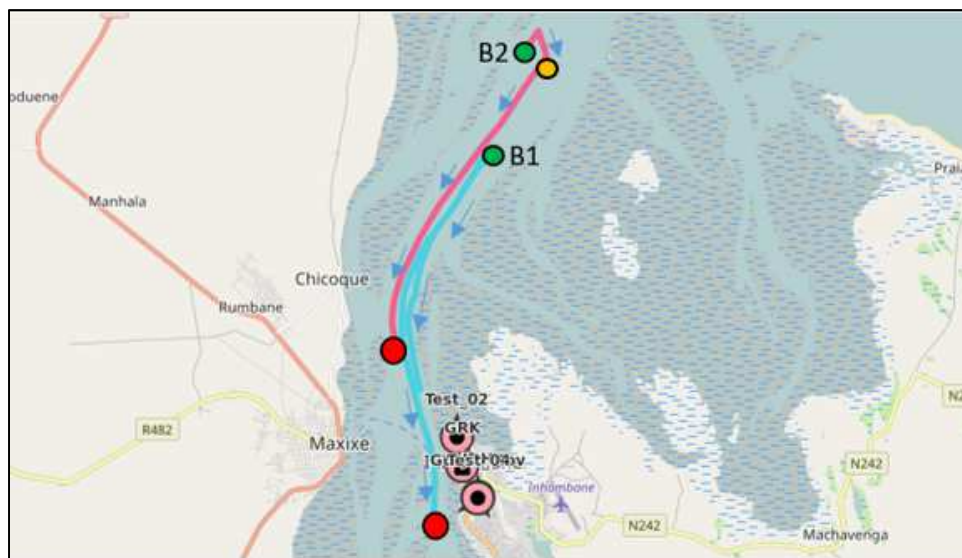


Figura 45. Trayectoria boyas lagrangianas día 21/07.



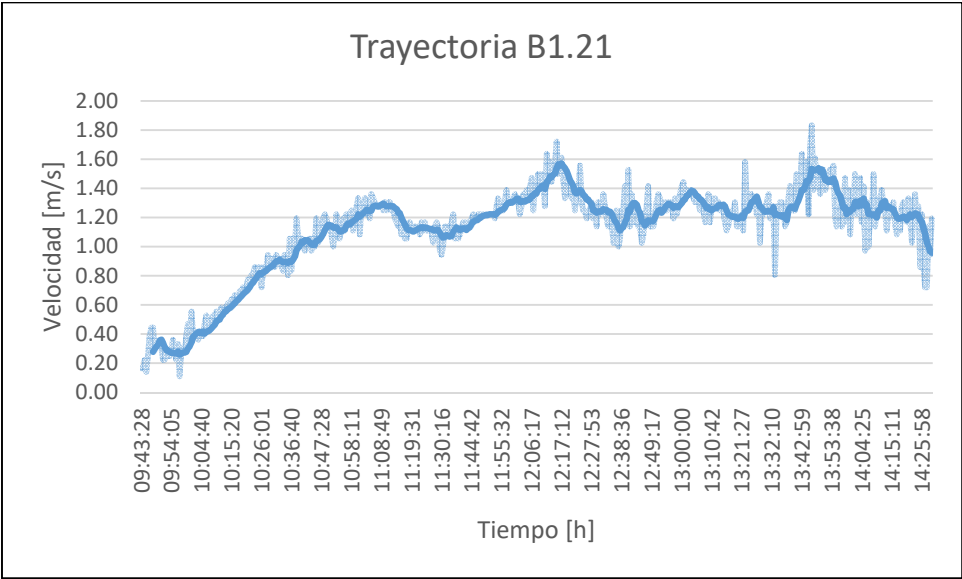


Figura 46. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.21.

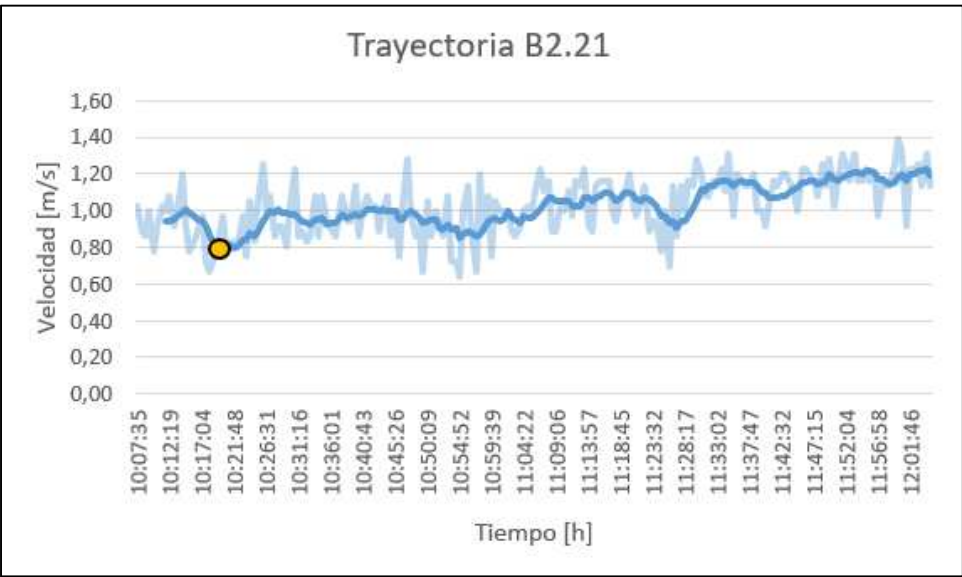


Figura 47. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B2.21.



El día 25/07 se registraron dos trayectorias, con el objetivo de caracterizar el movimiento de las corrientes al inicio del estuario, en la zona de *Nhanduga*, donde se encuentra aportación de agua dulce más importante de la Bahía. Las boyas avanzaron desde el inicio del estuario hacia la dirección de mar abierto, siguiendo la dirección del *Canal Central*.

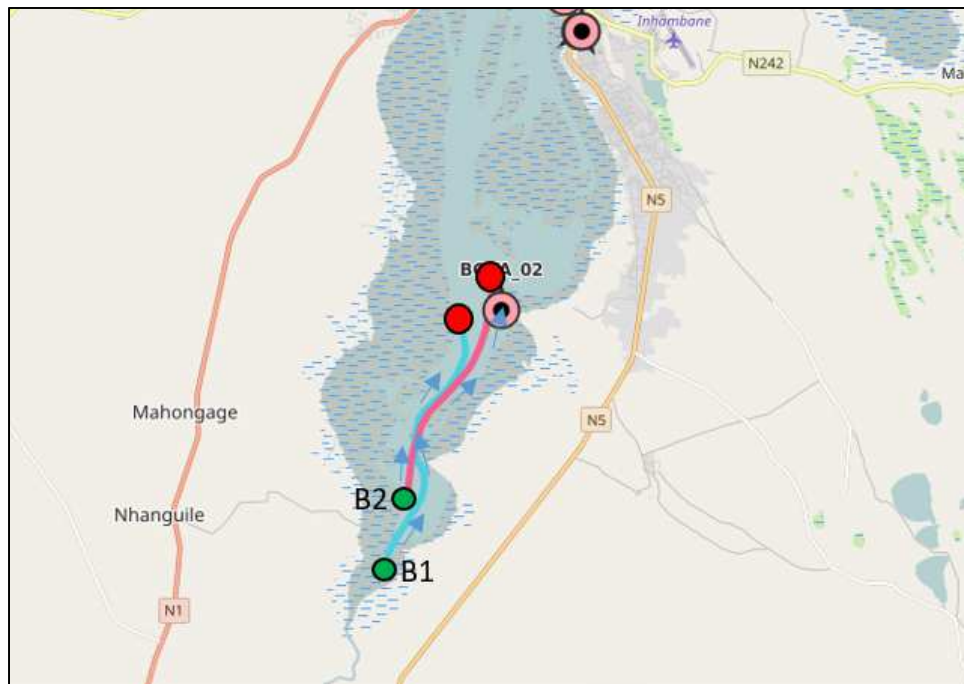


Figura 48. Trayectoria boyas lagrangianas día 25/07.

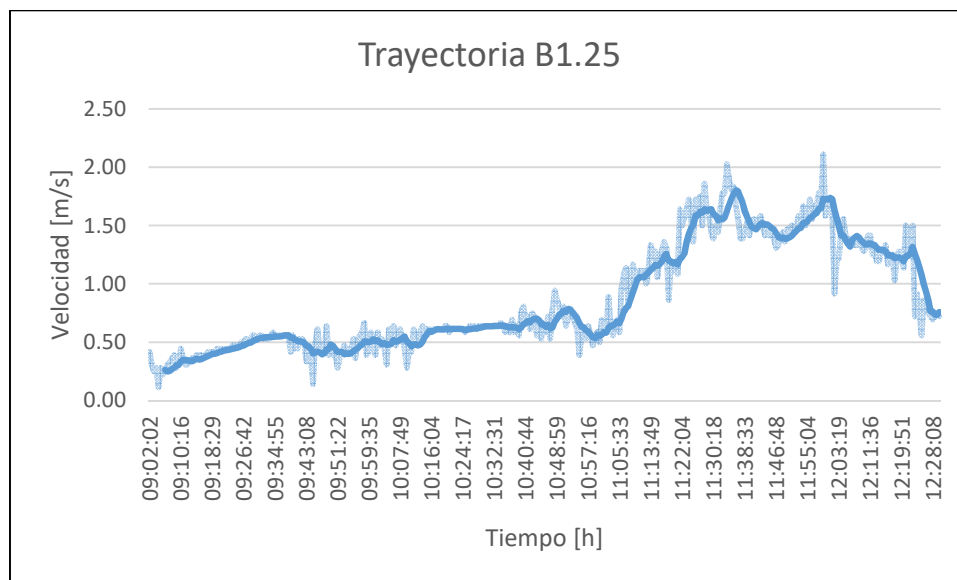


Figura 49. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.25.

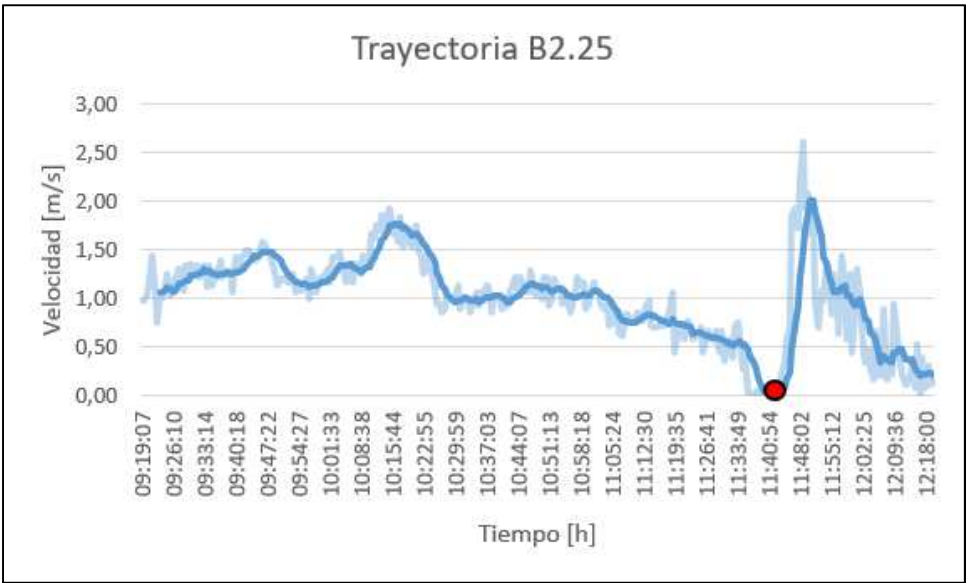


Figura 50. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B2.25.

La última jornada de boyas se procedió a estudiar la zona del estuario de *Morrumbene*, al noreste de la Bahía (Figura 3Error! Reference source not found.). La Boya 1 inició su trayectoria en el interior del estuario donde existen varias aportaciones de agua dulce, y se dirigió hacia *Ponta da Linga-Linga*, donde fue recogida.

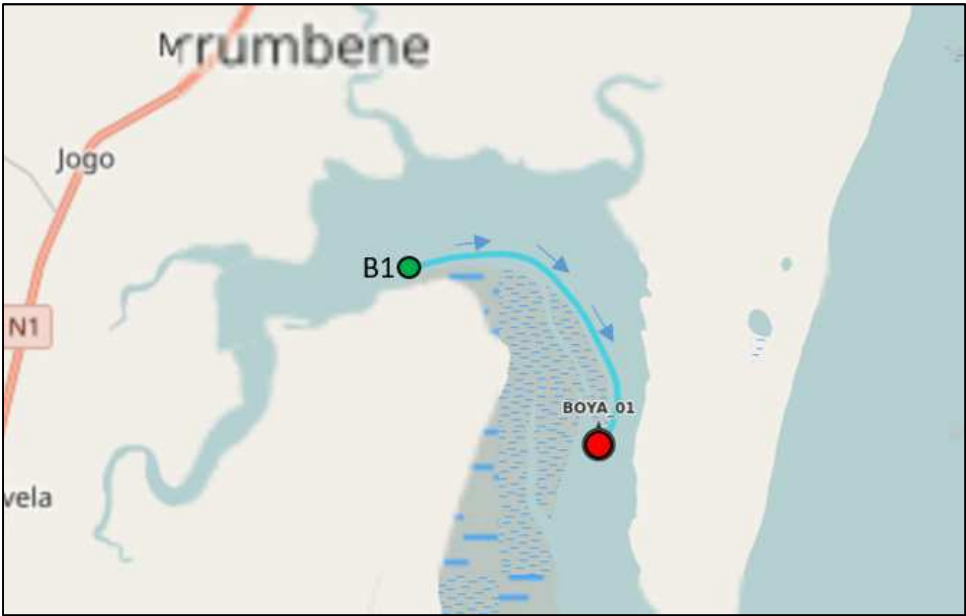


Figura 51. Trayectoria boyas lagrangianas día 26/07.

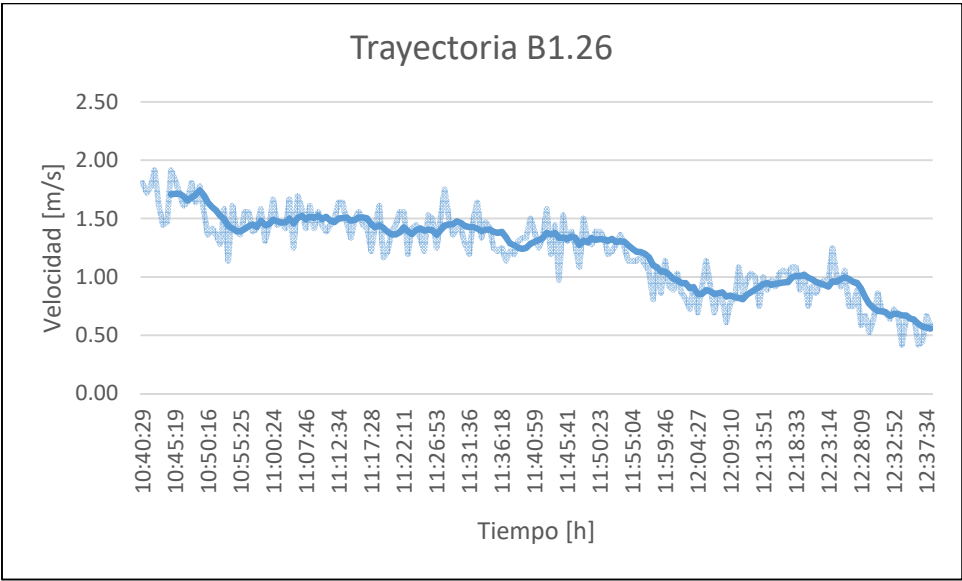


Figura 52. Gráfico velocidad - tiempo de la trayectoria B1.26.

Finalmente se procederá a presentar el resumen de los datos resultantes de estas trayectorias: la duración total de deriva, el tipo de marea, la dirección de la trayectoria, su intensidad o velocidad máxima, y la velocidad media del recorrido.

| Trayecto | Tiempo de deriva [h] | Tipo marea  | Dirección   | Distancia recorrida [m] | Velocidad máxima [m/s] | Velocidad media [m/s] |
|----------|----------------------|-------------|-------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| B1.19    | 3:09                 | Flood - Ebb | SO - N - NO | 2400.96                 | 1.09                   | 0.38                  |
| B1.20    | 5:16                 | Flood       | SO          | 7329.59                 | 1.89                   | 1.26                  |
| B2.20    | 4:19                 | Flood       | O - SO      | 5743.83                 | 1.53                   | 0.68                  |
| B3.20    | 2:57                 | Flood       | O - SO      | 4890.65                 | 2.17                   | 0.91                  |
| B1.21    | 4:48                 | Flood       | SO - S - SE | 10392.38                | 1.83                   | 1.10                  |
| B2.21    | 4:02                 | Flood       | SO          | 3998.96                 | 1.39                   | 1.03                  |
| B1.25    | 3:33                 | Ebb - Flood | NE          | 6139.89                 | 2.11                   | 0.86                  |
| B2.25    | 3:03                 | Ebb - Flood | NE          | 5360.42                 | 2.61                   | 0.99                  |
| B1.26    | 1:59                 | Ebb         | E - SE      | 4760.72                 | 1.92                   | 1.22                  |

Tabla 11. Resultados de las trayectorias de las boyas lagrangianas.

En primer lugar cabe destacar que, como se puede apreciar en la tabla anterior, los registros de velocidades aparecen en distintos momentos de marea (*Flood*, *Ebb* y *slack water*), y que deben tenerse en cuenta al analizar los resultados obtenidos. Además, es importante añadir que durante las primeras jornadas (días 19, 20 y 21 de julio) existían mareas muertas, donde la actividad mareal es menor y encontramos menores amplitudes. Por otro lado, los días 25 y 26, la luna era nueva, produciendo mareas vivas, con un mayor coeficiente de marea. Este cambio aparece marcado por una doble línea en la tabla anterior.

Así, tomando todos los valores registrados, vemos que existe una variación de velocidades máximas de marea entre 1.09 y 2.61 m/s, es decir, intensidades entre 2.11 y 5.08 nudos. La mínima se dio en el centro de la Bahía durante la primera jornada, influenciada por el *slack water* o punto de calma sufrido en el cambio de marea llenante a vaciante, añadido a la situación de mareas muertas. Por otro lado, el valor máximo aparece el día 25/07 en la zona de *Nhanduga*, al inicio del estuario, con mareas vivas, donde el aporte de agua dulce es mayor y, por tanto, genera más perturbaciones sobre las aguas de la Bahía.

En cuanto a las velocidades medias de las trayectorias, sólo la mínima coincide con el comportamiento de las intensidades, registrada en la trayectoria B1.19 con 0.38 m/s. Sin embargo, la velocidad media máxima, 1.26 m/s, se da en el *Canal Central* con marea llenante y muerta (B1.20).

Tomando estos resultados, podemos realizar una tabla resumen con el promedio de los valores obtenidos:

|                  | Velocidad máxima [m/s] | Velocidad media [m/s] |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| Mareas Muertas   | 1.65                   | 0.89                  |
| Mareas Vivas     | 2.21                   | 1.02                  |
| Valores promedio | <b>1.84</b>            | <b>0.94</b>           |

*Tabla 12. Resumen de velocidades, media y máxima, de corriente de marea.*

Por último, podemos observar como era de prever que, además de la velocidad, la dirección de las trayectorias varía dependiendo del tipo de marea presente. Las mareas llenantes (*Flood*) hacen que las trayectorias tomen direcciones hacia el Sur o interior de la Bahía, mientras que la marea vaciante (*Ebb*) hace desplazar las boyas hacia el Norte o mar abierto. La única excepción aparece en la zona de *Morrumbene*, el recodo al noroeste de la Bahía, donde la marea vaciante lo hace en dirección Este – Suereste, puesto que es el sentido que sigue la masa de agua para llegar a mar abierto.

## 6. DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo son aportaciones originales derivadas de la campaña de campo realizada en la Bahía de Inhambane en julio de 2017. Centrándose en el estudio de la hidrodinámica del estuario, pretenden la caracterización de las variables temperatura, salinidad y densidad del mismo, su comportamiento y las corrientes de marea existentes en él.

A continuación, se discuten estos aspectos importantes de la hidrodinámica, previamente tratados con la realidad del caso de estudio y en consonancia a las referencias teóricas utilizadas.

### 6.1. Tipo de estuario

El presente trabajo revisó dos modelos de clasificación estuáricos basados en la salinidad y el rango de mareas.

El modelo propuesto por Cameron y Pritchard (1963), identifica tres tipos de estuarios según su estructura vertical de salinidad, definida por el grado de mezcla entre las capas de agua dulce y salada. Esta clasificación a su vez permite reconocer el tipo de circulación presente en el estuario.

Las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad analizadas a partir de las mediciones CTD muestran perfiles medios prácticamente verticales, que permiten afirmar que no se produce estratificación en la Bahía, por lo que nos encontramos claramente ante un estuario totalmente mezclado.

Además, el hecho de que el volumen de agua dulce aportado por los ríos y canales de la Bahía sea insignificante comparado con el volumen de marea, favorece la situación de un estuario bien mezclado, reforzando la idea anterior.

La única zona que presenta cierta estratificación es *Morrumbene*, donde la marea no posee la fuerza necesaria para mezclar el agua, debido a la gran aportación de agua dulce.

Las ligeras variaciones de las mismas variables (temperatura, salinidad y densidad) con la profundidad y la zona dentro del estuario, nos permite identificar aguas menos salobres y con menor densidad en la parte oeste y al contrario en el este. Es por este hecho que, en relación a la circulación del estuario, podemos concluir que la Bahía de Inhambane presenta una circulación lateral en sentido horario producto de las corrientes residuales presentes en un estuario bien mezclado. El agua marina penetra con la marea llenante por la zona del *Canal da Ilha* y ésta, circula por el interior de la Bahía saliendo de nuevo hacia el mar en marea vaciante por el *Canal Lateral*, permitiendo la renovación del agua dentro del propio estuario.

El siguiente modelo propuesto, el modelo de Davies (1964), permite la clasificación del estuario en función su rango de marea.

Basándonos en la descripción de la zona de estudio, se estiman unas alturas de marea de 3m (Hoguane, 1999). Por otro lado, en los resultados del presente trabajo se ha observado, a través de las mediciones CTD con estaciones de posición fija, una variación promedio de 2.37m (3.41m en mareas vivas y 1.34m en mareas muertas), coincidiendo con las tablas de marea. Así, se puede concluir que la Bahía de Inhambane es un estuario mesomareal, con variaciones entre los 2 y 4 metros de nivel de marea.

## 6.2. Caracterización de la Bahía de Inhambane

Una vez descrita la tipología del estuario objeto de estudio se procederá a discutir los resultados de las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad analizadas, permitiendo la zonificación de la propia Bahía. Siguiendo con esto último se han podido distinguir cuatro principales zonas dentro de la Bahía de Inhambane.

El *Canal Central*, que recorre toda la latitud de la Bahía, se inicia en la desembocadura del río *Mutamba* y finaliza en mar abierto. Posee temperaturas en torno a los 23.5 °C y registra las mayores profundidades. En cuanto a la salinidad y la densidad presenta valores medios de 34 PSU y 24 kg/m<sup>3</sup>. En la zona influenciada por el aporte de agua dulce, el principal de la Bahía, al Sur presenta valores algo más bajos (32 PSU y 22 kg/m<sup>3</sup>), y hacia mar abierto alcanza los valores máximos de ambas variables (36 PSU y 26 kg/m<sup>3</sup>), delimitando la zona de mezcla máxima.

El *Canal Lateral*, que finaliza en el pequeño estuario de *Morrumbene*, y que serán diferenciadas como dos zonas. Por un lado, el *Canal Lateral*, presenta características similares a la parte media del *Canal Central*. Por otro, el estuario de *Morrumbene* registra los valores de salinidad y densidad más bajos de la Bahía (26 PSU y 16 kg/m<sup>3</sup>) y las menores profundidades; aunque la temperatura está en el rango medio de los 23 °C.

El *Canal da Ilha*, rodeando pequeñas islas y barras en el ensanchamiento de la Bahía, posee las temperaturas mínimas, en torno a los 21.5 °C. Sin embargo, los valores de salinidad y densidad se sitúan en los máximos de la Bahía, 36 PSU y 26 kg/m<sup>3</sup>, situación predecible por su proximidad y conexión con mar abierto.

Así, nos encontramos en un estuario pequeños gradientes de sus variables influenciados por la zonificación existente. Sus rangos se sitúan entre los 21 y 24.5 °C de temperatura; 26 y 36 PSU de salinidad; y entre 17 y 25 kg/m<sup>3</sup> de densidad.

Este rango de salinidades coincide con la salinidad máxima de 35.4 PSU registrada en el Canal de Madagascar (Cândida S., 2002). Así, podemos predecir que en las zonas donde las aguas de la Bahía alcanzan valores similares a este máximo están influenciadas por las aguas continentales, representando el fin del estuario. Además, respaldándonos en el mismo artículo, podemos concluir que existen pocas variaciones de la salinidad a nivel estacional, aunque para confirmarlo sería necesario hacer diferentes campañas en otras épocas del año.

Otro importante resultado que debemos resaltar tras la observación de los gráficos correspondientes a las secciones de las mediciones CTD, tanto en superficie como las verticales, es el hecho de que la influencia más potente sobre la densidad es la salinidad, y no la temperatura; lo que implica una importante variación espacial de las salinidades.

Finalmente, aunque tengamos profundidades desde los 0.43m en el estuario de *Morrumbene* hasta los 17.69m en el *Canal Central*, fuertemente influenciadas por el tipo de marea existente, inicio y final de la bajamar respectivamente, la profundidad promedio, de la Bahía de Inhambane se sitúa en torno a los 7.76 metros.

A pesar de que la mayoría de las mediciones se haya realizado para marea vaciante o bajamar, debemos tener en cuenta que esta profundidad promedio de 7.76 metros proviene de la totalidad de las mediciones; por lo que se refiere a una situación general. Debido a las pocas mediciones de profundidad durante la pleamar y la diferencia de cotas dentro de la Bahía, no se ha considerado hallar valores de profundidad más específicos. Las profundidades máximas registradas por todas las mediciones CTD se encuentran en el Anejo C.

Por otro lado, y teniendo en cuenta que los cálculos se han realizado a partir de un solo ciclo de marea y en fase de mareas muertas, hemos obtenido un prisma de marea de  $3.40 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  en mareas vivas y de  $3.06 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  en mareas muertas. Ambos valores representan aproximadamente un 1% del total del agua de la Bahía. Este resultado refleja el volumen de agua intercambiado entre el estuario y mar abierto durante un ciclo de marea. Junto a él, el tiempo de permanencia medio de esta agua en el interior del estuario es de 41 días. Estos resultados reflejan una renovación relativamente rápida del agua del estuario, dato que resultaría relevante para posibles usos futuros de la Bahía de Inhambane como planes de saneamiento, gestión litoral, asentamiento de una central de energía mareomotriz, etc.

### 6.3. Corrientes de marea

A través de la orografía de la Bahía de Inhambane se han podido distinguir tres canales que la recorren, y que se corresponden con las principales corrientes de marea de la misma (Figura 12): *Canal Lateral*, *Canal Central* y *Canal da Ilha*. Estas corrientes han sido identificadas gracias a la campaña de boyas lagrangianas, aunque no todas presentan las mismas características.

En general, la intensidad media (velocidad máxima media) registrada en el estuario es de 1.84 m/s, es decir 3.57 nudos, con una velocidad media de 0.94 m/s. En marea vaciante la dirección predominante es la Norte, hacia mar abierto; y la dirección Sur cuando nos encontramos en marea llenante. Como hemos visto, esta situación de direccionalidad es contraria en la zona de *Morrumbene*, debido a su situación en el Norte de la desembocadura de la Bahía. Así, esta última será tratada como una corriente independiente, al igual que en las distribuciones del apartado anterior.

Dividiendo en mareas muertas y vivas, tenemos una velocidad máxima de 1.65 y 2.21 m/s respectivamente. En cuanto a las velocidades medias son de 0.89 m/s en mareas muertas y 1.02 m/s en mareas vivas.

Si separamos por canales, y centrándonos en la intensidad o velocidad máxima de corriente de marea, podemos decir que las intensidades más altas se concentran en el *Canal Central*, con una intensidad promedio de 1.99 m/s (3.86 nudos); siguiéndole con 1.89 m/s tenemos el *Canal da Ilha*; el estuario de *Morrumbene* registra 1.92 m/s y, por último, el *Canal Lateral*, con 1.59 m/s de velocidad máxima promedio.

Analizando las intensidades en función de la marea, y tomando como referencia el *Canal Central*, encontramos que la vaciante, con 2.36 m/s, es superior a la llenante, con 1.61 m/s.



## 7. CONCLUSIONES

Las características morfológicas particulares de la Bahía de Inhambane condicionan el comportamiento hidrodinámico del estuario, donde encontramos una mezcla total del agua dulce y salada, sin ningún tipo de estratificación, exceptuando la pequeña zona de *Morrumbene*. Este hecho queda reforzado con los perfiles CTD analizados, que presentan una verticalidad homogénea en salinidad, densidad y temperatura en la totalidad de la superficie. Añadido a este comportamiento de estuario bien mezclado, encontramos una circulación lateral horaria que permite la renovación de la masa de agua del mismo.

Existe una leve zonificación dentro de la Bahía marcada por las corrientes y características hidrodinámicas existentes, aunque que presenta bajos gradientes en dichas variables. Las zonas existentes son: el *Canal Lateral*, el estuario de *Morrumbene*, el *Canal Central* y el *Canal da Ilha*.

Esta zonificación nos permite cualificar la influencia del agua dulce, que prácticamente se restringe al inicio de la Bahía, en la zona de *Nhanduga*, y en *Morrumbene*.

La profundidad media de la Bahía se sitúa en torno a los 7.76 metros, siendo más acusada en el *Canal Central* de la misma, donde encontramos la máxima de 17.69 metros, registrada al final de la marea vaciante, y presentando niveles de cota más bajos, al inicio de la bajamar, en la zona del estuario de *Morrumbene*.

En cuanto a las variables hidrodinámicas más relevantes, nos encontramos con rangos que se sitúan entre los 21 y 24.5 °C de temperatura; 26 y 36 PSU de salinidad; y entre 17 y 25 kg/m<sup>3</sup> de densidad. Los valores más altos de densidad y salinidad, que delimitan la zona de mezcla máxima, se encuentran próximos a mar abierto, en el *Canal Central* y en el *Canal da Ilha*. En este segundo canal también se registran los valores de menor temperatura. Por el contrario, en *Morrumbene* encontramos las densidades y salinidades más bajas, influenciadas por el aporte de agua dulce de la zona.

Además, queda de manifiesto que la densidad es controlada o influenciada totalmente por la salinidad, y no por la temperatura, haciendo que posean comportamientos similares en los diferentes perfiles obtenidos.

Por otro lado, las mareas existentes en la zona, con una variación de nivel promedio de 2.37 metros (3.41m en mareas vivas y 1.34m en mareas muertas), indican un comportamiento estuárico mesomareal de la Bahía. Estas mareas provocan intensidades de corrientes de marea de 1.84 m/s (2.21 m/s en mareas vivas y 1.65 m/s en mareas muertas) y velocidades medias de 0.94 m/s (1.02 m/s en mareas vivas y 0.89 m/s en mareas muertas), que también varían ligeramente según la zona de la Bahía. Las menores se encuentran en el *Canal Lateral* y las mayores en el *Canal Central*. En general, la marea vaciante presenta valores superiores de intensidad respecto a la marea llenante. La vaciante origina trayectorias de dirección Norte, hacia mar abierto; la llenante posee dirección Sur, hacia el interior de la Bahía.

El prisma de marea, o volumen de agua intercambiado entre la Bahía y mar abierto, corresponde a un 1% del volumen total del estuario; el tiempo de permanencia del agua en la Bahía de Inhambane es de aproximadamente 41 días.

En relación a las intensidades de marea, aunque los datos han sido validados, se consideran insuficientes para caracterizar de manera absoluta las corrientes del estuario. A pesar de esto, sí que permiten tener una idea aproximada y real de los órdenes de magnitud existentes en la Bahía, objetivo del presente estudio. Las fases de marea presentes durante la campaña fueron: de 12 a 15/07 – mareas vivas (luna llena), de 16 a 23/07 – mareas muertas (luna menguante), y de 24 a 26/07 – mareas vivas (luna nueva).

Por último, cabe destacar que estas conclusiones han sido obtenidas a partir del análisis de datos originales de una única campaña de campo realizada en julio de 2017, en la denominada época seca. Este hecho hace que no se haya podido tener en cuenta la variación estacional en el comportamiento de la Bahía. Dicho esto, la línea general de resultados analizados durante este trabajo hace prever un comportamiento de la Bahía de Inhambane similar durante todo el año al presentado.

## 8. ANEJOS

### A. Resultados por transectos (perfiles CTD)

- Canal Lateral (Medidas 13/07/2017)

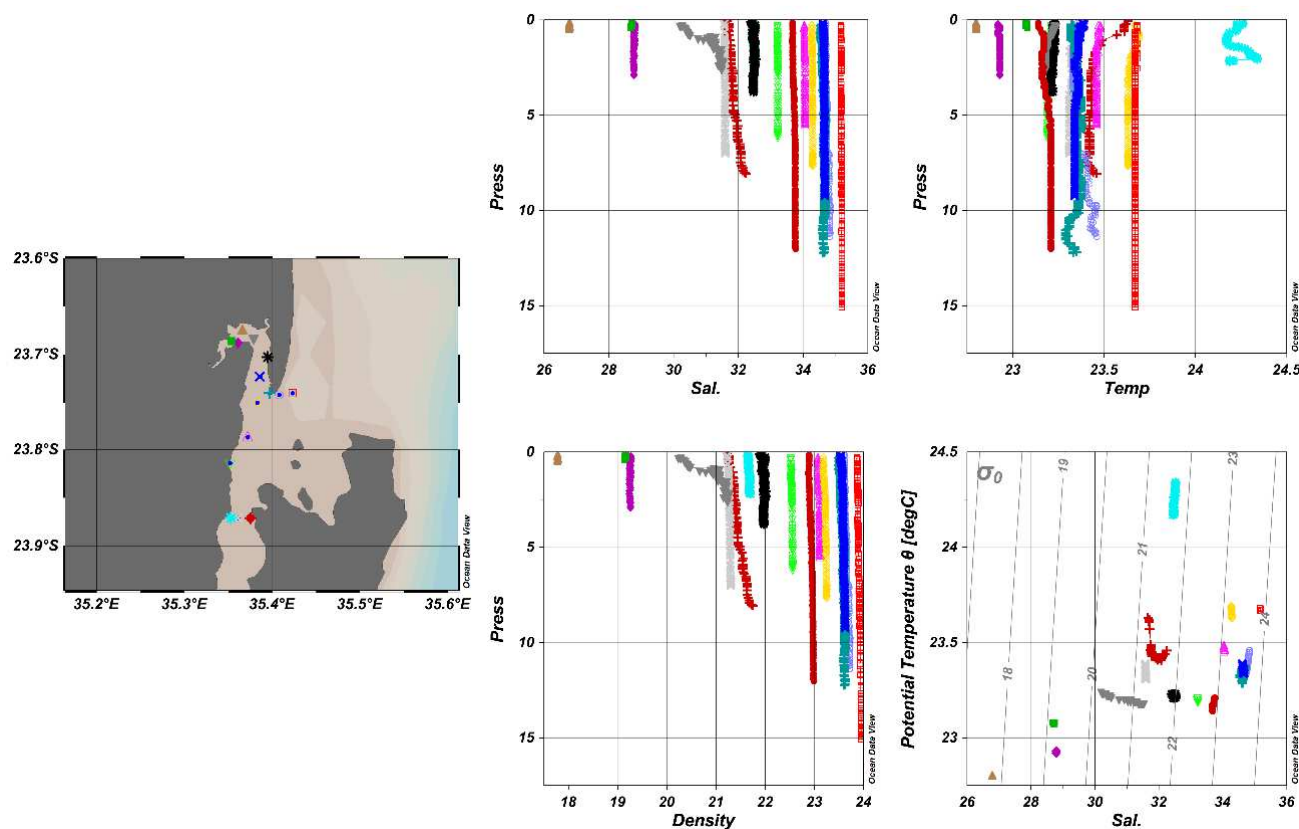


Figura 53. Perfiles CTD del Canal Central.

- Canal Central (Medidas 14/07/2017)

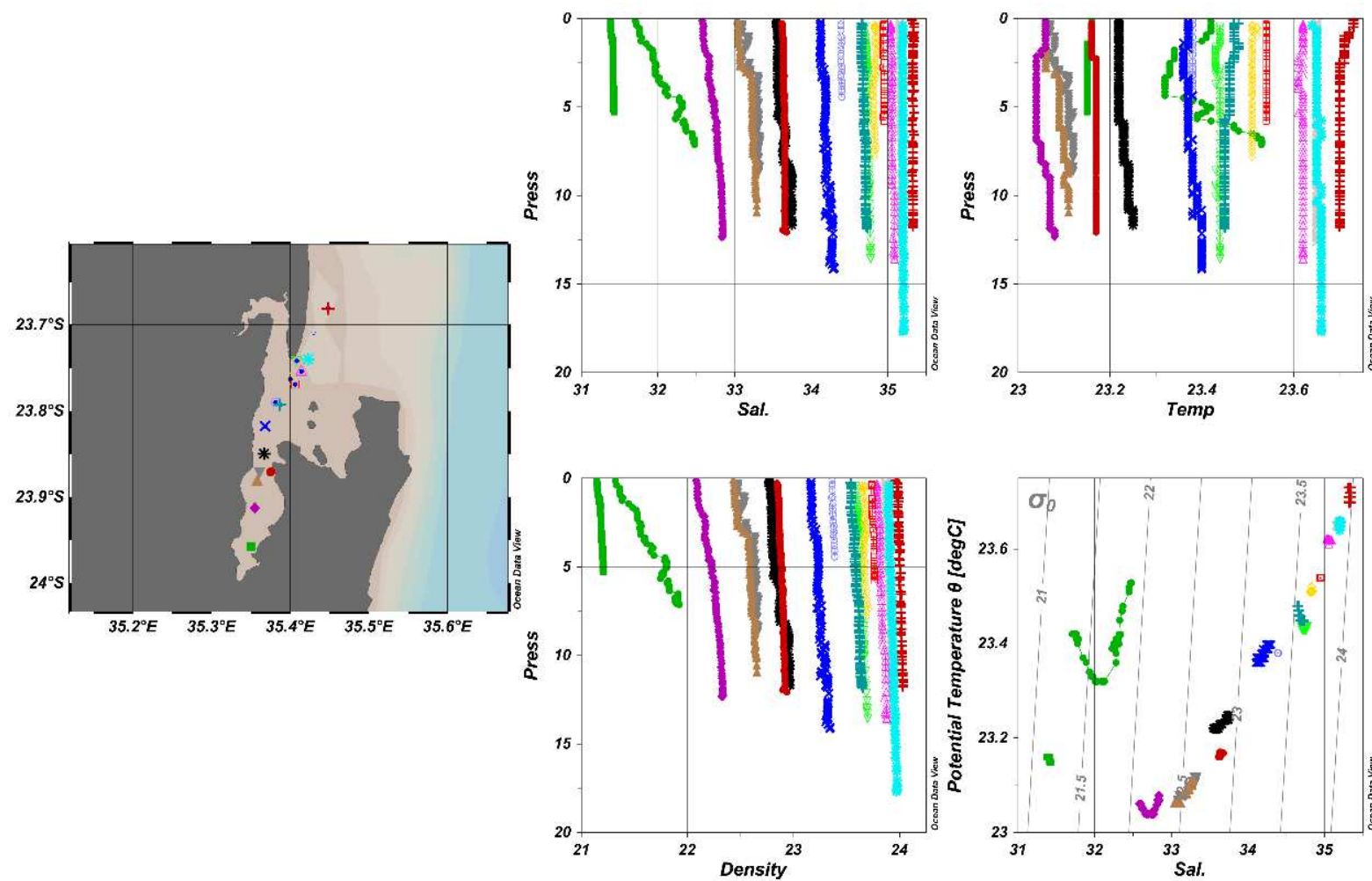


Figura 54. Perfiles CTD del Canal Lateral.

- Morrumbene (Medidas 19/07/2017)

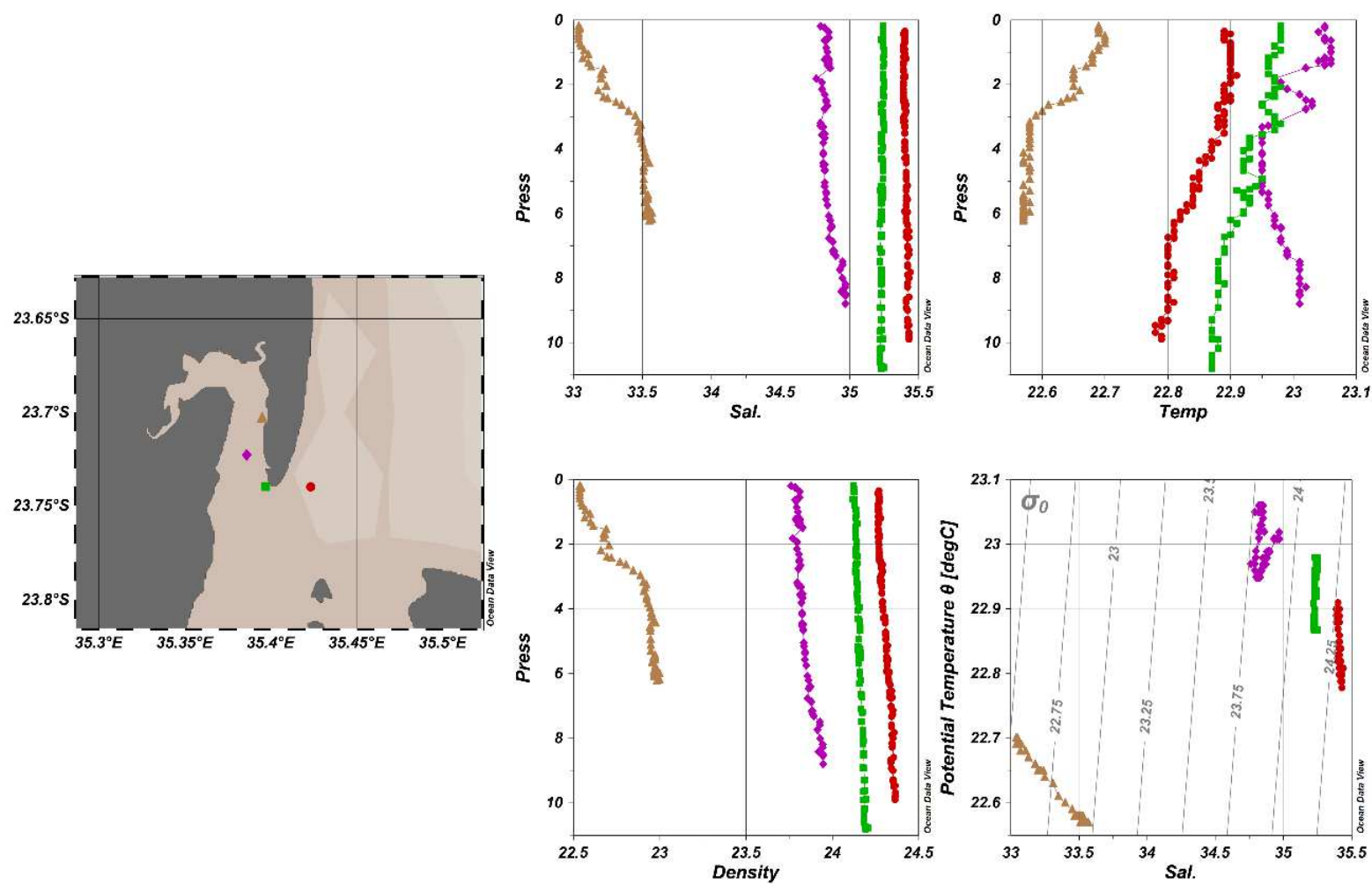


Figura 55. Perfiles CTD de Morrumbene.

- Canal da Ilha (Medidas 20/07/2017)

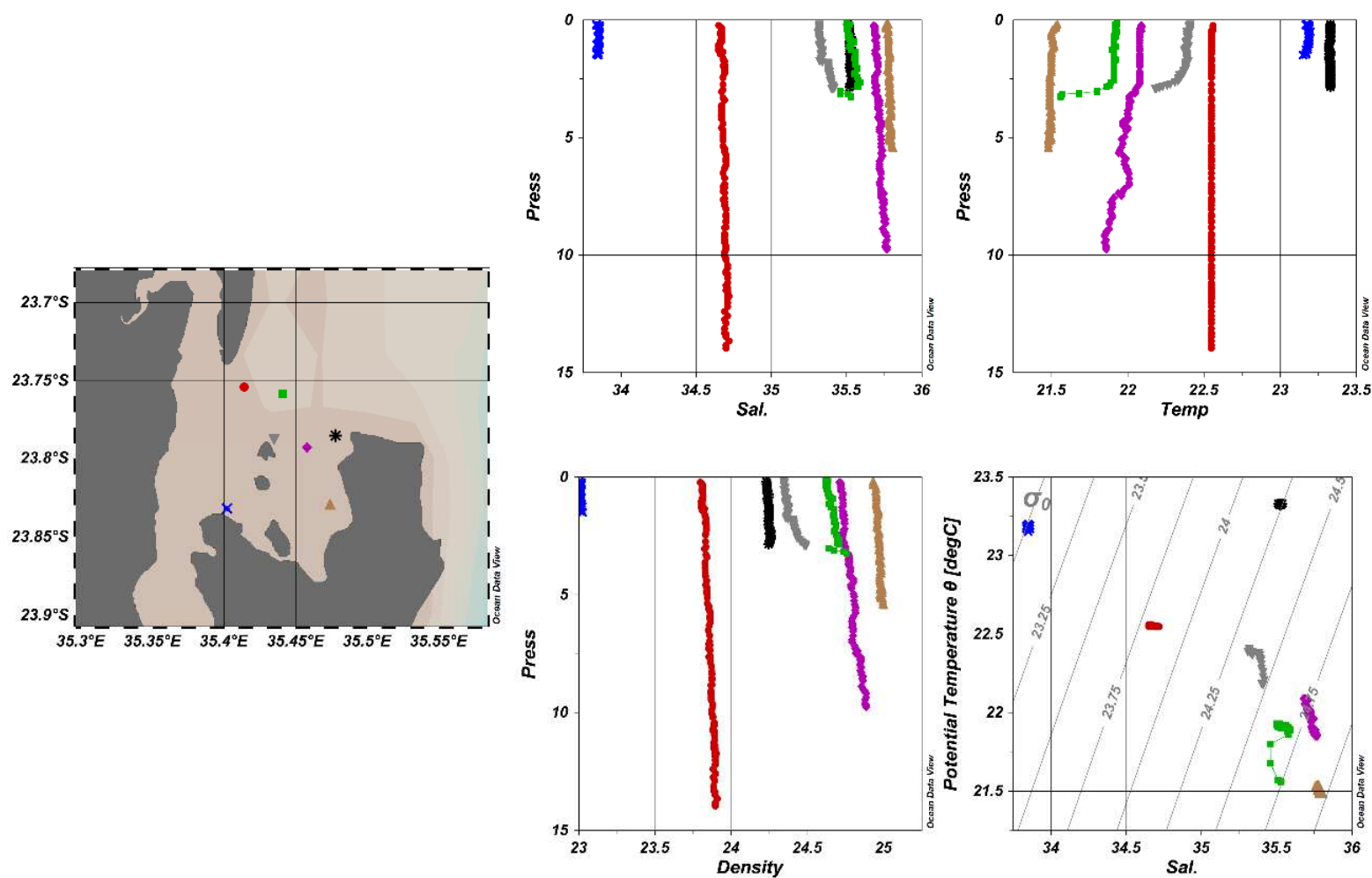


Figura 56. Perfiles CTD del Canal da Ilha.

B. Comparativa de mediciones CTD con posición fija

- Estación H1

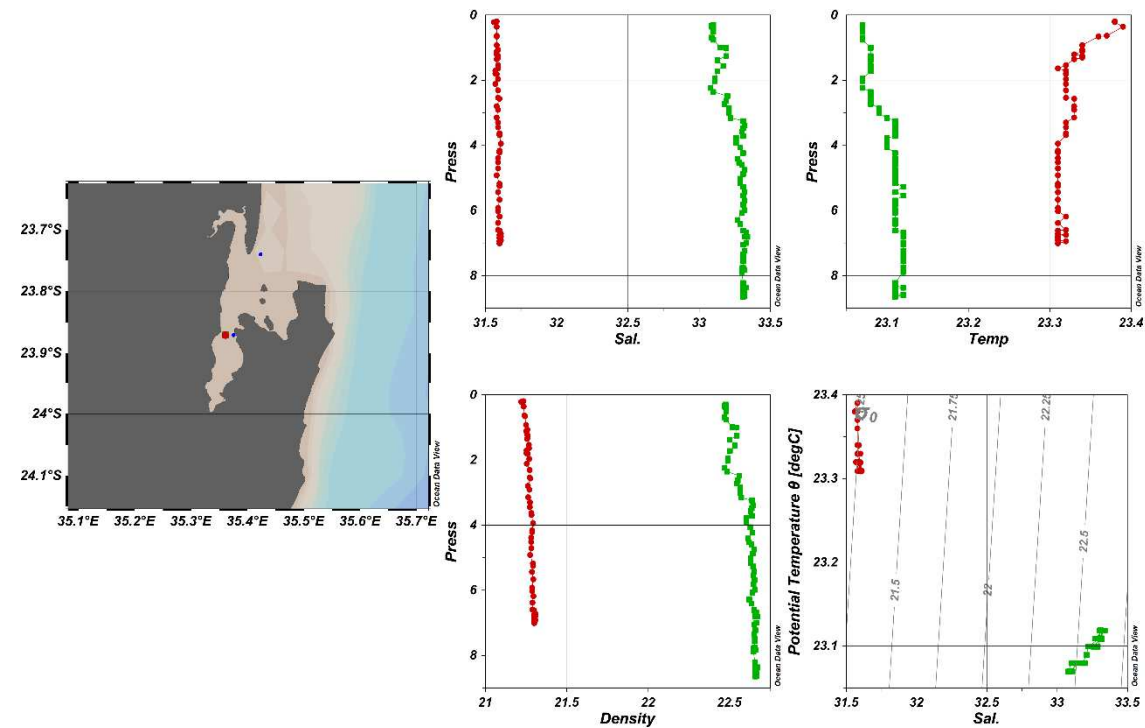


Figura 57. Perfiles de la estación fija H1.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos rojos               | H1.1     | Ebb        | 11:37        | 13/07/17         |
| Cuadrados verdes           | H1.2     | Ebb        | 07:16        | 14/07/17         |

Tabla 13. Datos de los perfiles de la estación fija H1.



- Estación H5

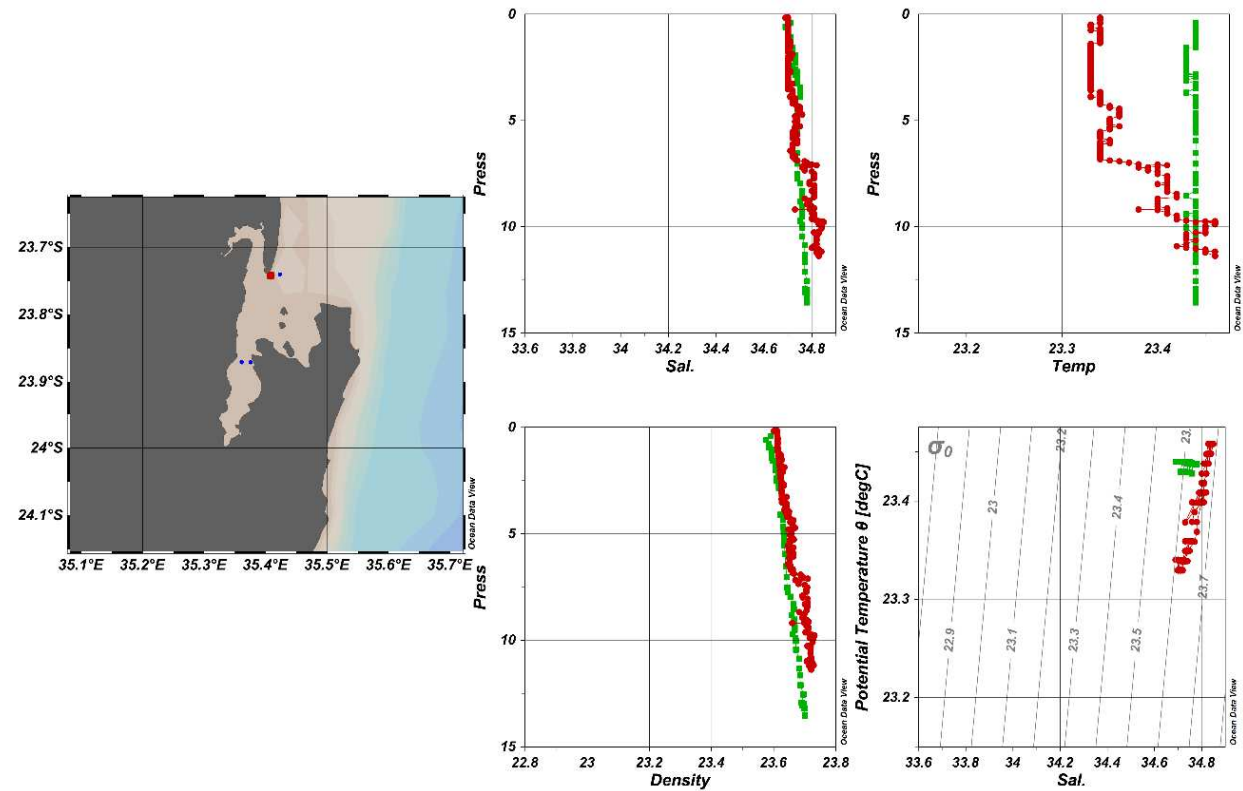


Figura 58. Perfiles de la estación fija H5.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos rojos               | H5.1     | Ebb        | 08:41        | 13/07/17         |
| Cuadrados verdes           | H5.2     | Ebb        | 07:16        | 14/07/17         |

Tabla 14. Datos de los perfiles de la estación fija H5.

- Estación H6

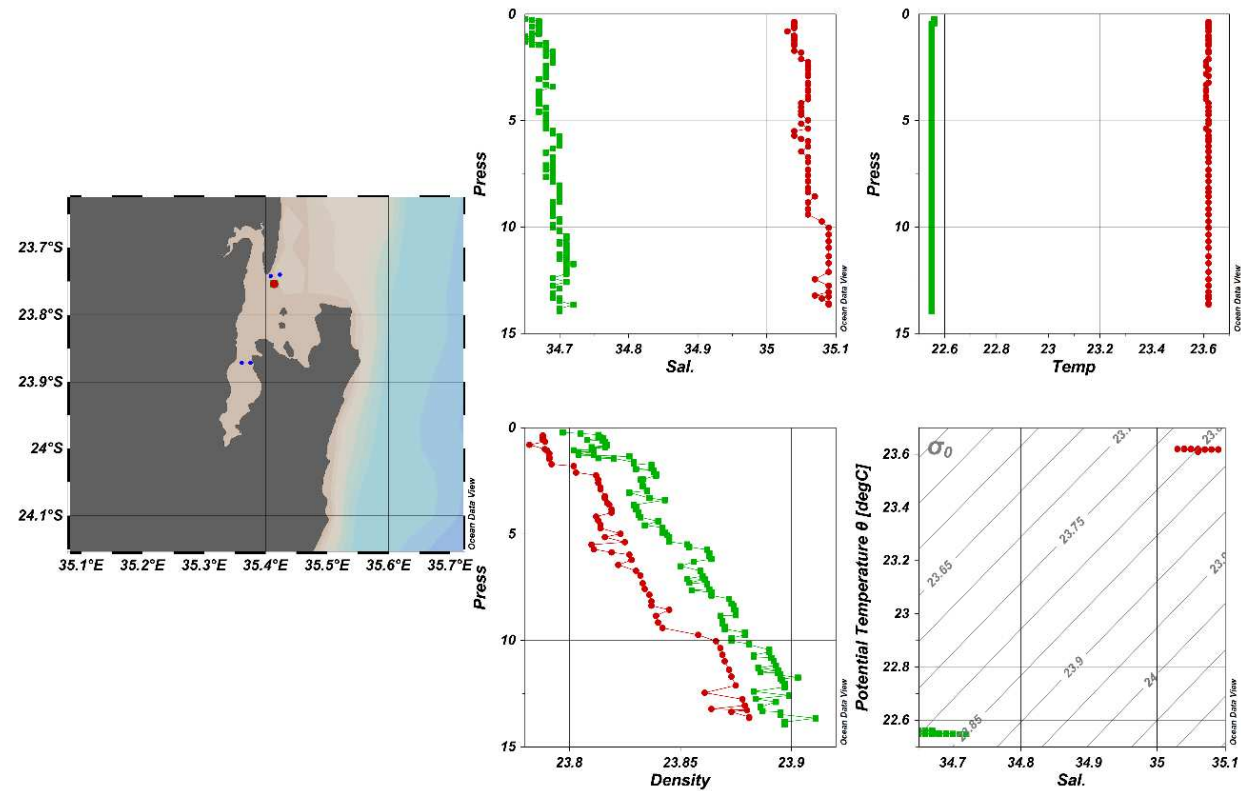


Figura 59. Perfiles de la estación fija H6.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos rojos               | H6.1     | Ebb        | 09:15        | 14/07/17         |
| Cuadrados verdes           | H6.2     | Flood      | 07:43        | 20/07/17         |

Tabla 15. Datos de los perfiles de la estación fija H6.

- Estación M5

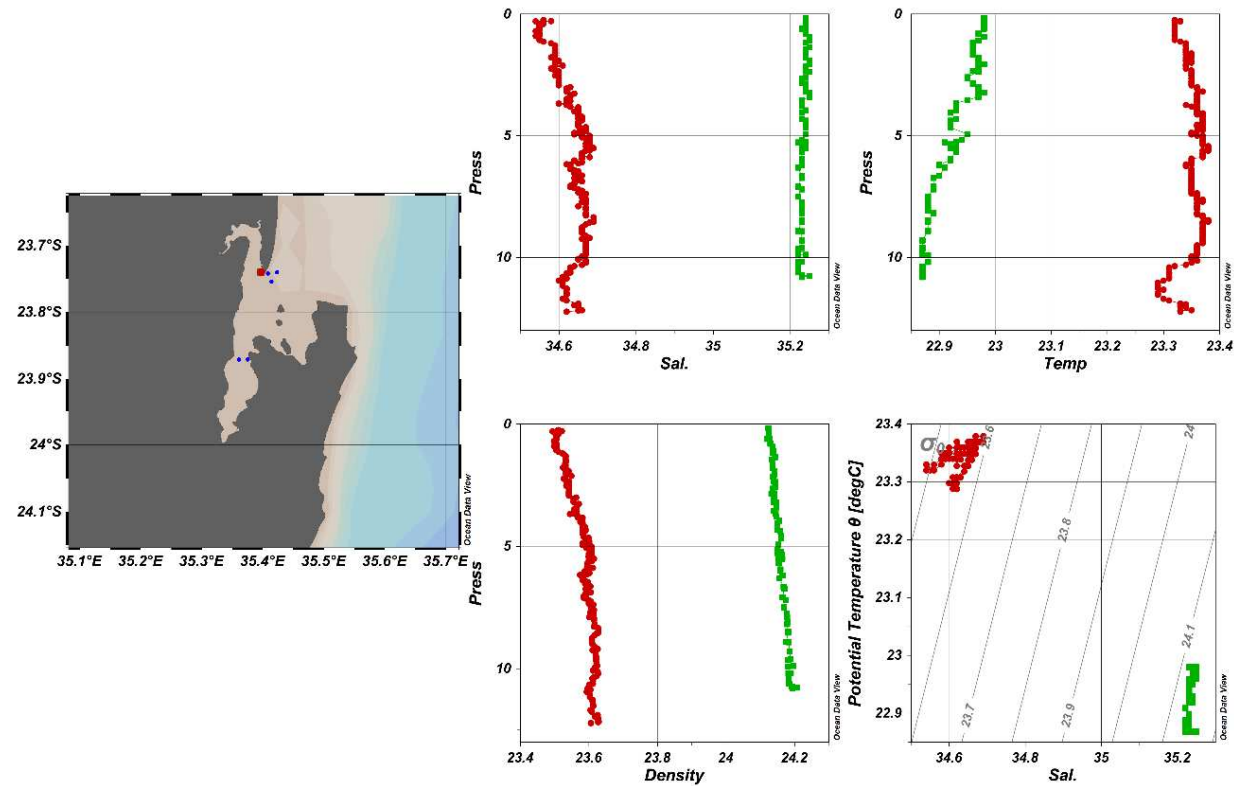


Figura 60. Perfiles de la estación fija M5.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos rojos               | M5.1     | Ebb        | 08:28        | 13/07/17         |
| Cuadrados verdes           | M5.2     | Ebb        | 11:34        | 19/07/17         |

Tabla 16. Datos de los perfiles de la estación fija M5.

- Estación M6

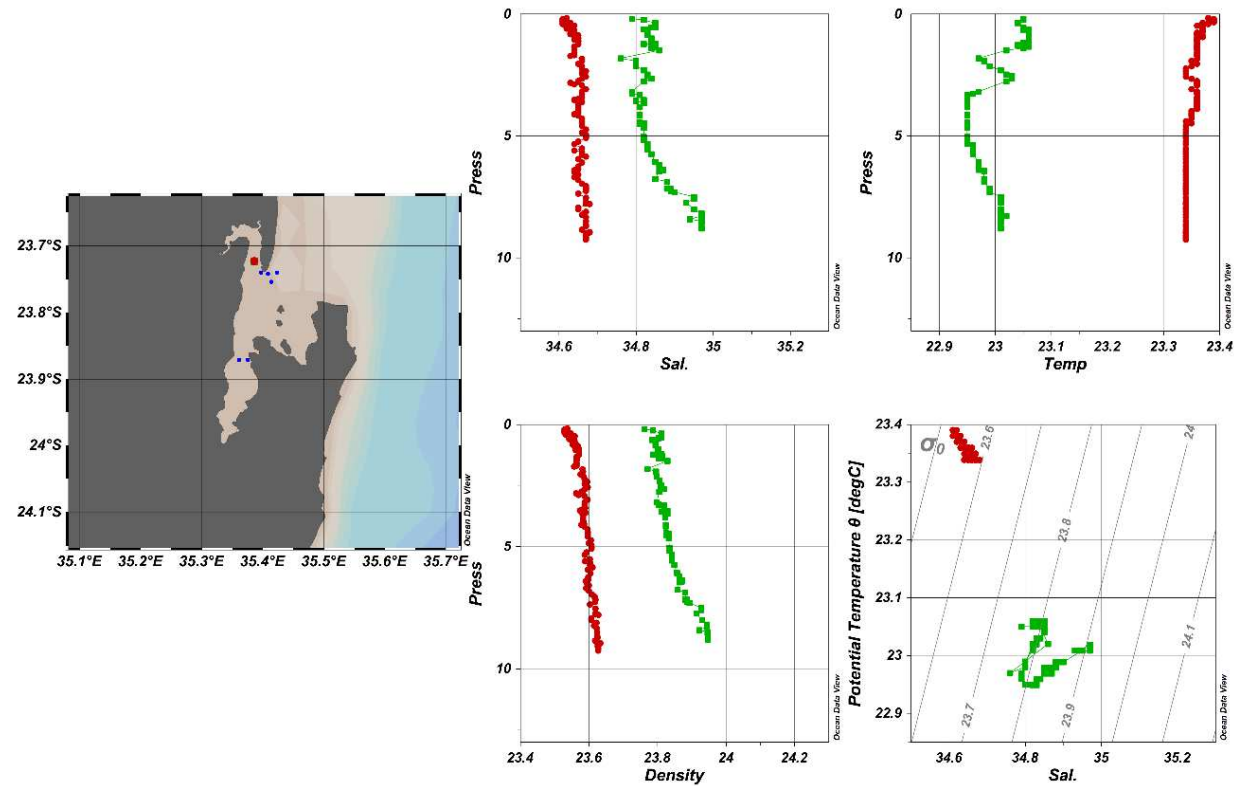


Figura 61. Perfiles de la estación fija M6.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos rojos               | M6.1     | Ebb        | 08:13        | 13/07/17         |
| Cuadrados verdes           | M6.2     | Ebb        | 12:33        | 19/07/17         |

Tabla 17. Datos de los perfiles de la estación fija M6.

- Estación M7

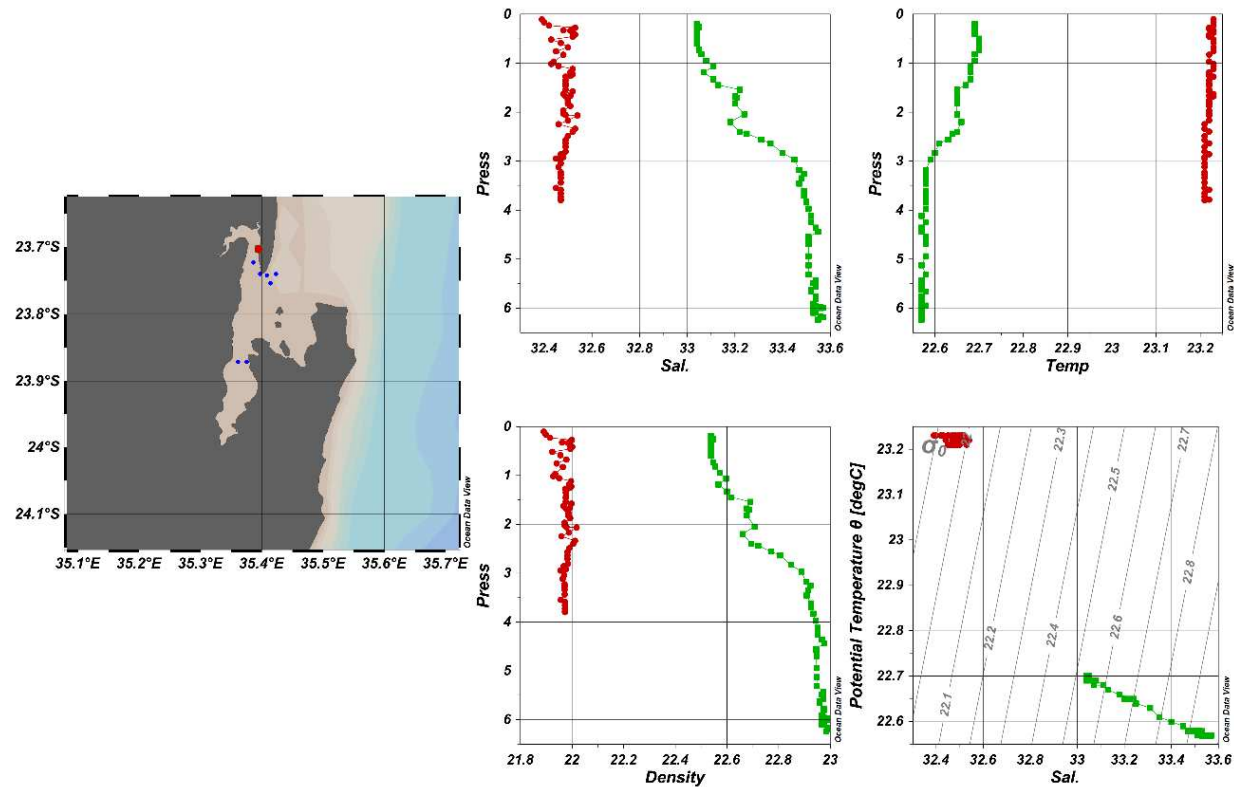


Figura 62. Perfiles de la estación fija M7.

| Representación en el plano | Estación | Tipo marea | Hora GMT [h] | Fecha [dd/mm/aa] |
|----------------------------|----------|------------|--------------|------------------|
| Puntos rojos               | M7.1     | Ebb        | 07:57        | 13/07/17         |
| Cuadrados verdes           | M7.2     | Ebb        | 12:50        | 19/07/17         |

Tabla 18. Datos de los perfiles de la estación fija M7.

### C. Profundidades máximas registradas por las mediciones CTD

A continuación, se presentan las profundidades máximas (*Prof. Máx*), medidas en metros, registradas por todas las medidas CTD realizadas en la campaña de Julio de 2017.

La profundidad media de la Bahía de Inhambane, en una situación media de fase de marea, es de 7.76 metros.

| <i>Estación<br/>(13.07)</i> | <i>Tipo de<br/>marea</i> | <i>Prof.<br/>Máx.</i> | <i>Estación<br/>(14.07)</i> | <i>Tipo de<br/>marea</i> | <i>Prof.<br/>Máx.</i> | <i>Estación<br/>(18.07)</i> | <i>Tipo de<br/>marea</i> | <i>Prof.<br/>Máx.</i> | <i>Estación<br/>(19.07)</i> | <i>Tipo de<br/>marea</i> | <i>Prof.<br/>Máx.</i> | <i>Estación<br/>(20.07)</i> | <i>Tipo de<br/>marea</i> | <i>Prof.<br/>Máx.</i> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| C01I                        | <i>Ebb</i>               | 12.02                 | C02I                        | <i>Flood</i>             | 12.07                 | R0                          | <i>Flood</i>             | 4.74                  | C8                          | <i>Flood</i>             | 9.90                  | H6                          | <i>Flood</i>             | 13.96                 |
| <b>M10.2</b>                | <b><i>Ebb</i></b>        | <b>0.43</b>           | C1                          | <i>Ebb</i>               | 5.29                  | R1                          | <i>Flood</i>             | 5.14                  | M5                          | <i>Ebb</i>               | 10.81                 | I3                          | <i>Flood</i>             | 3.26                  |
| M9                          | <i>Ebb</i>               | 2.91                  | C2                          | <i>Ebb</i>               | 12.33                 | R3                          | <i>Flood</i>             | 5.87                  | M6                          | <i>Ebb</i>               | 8.80                  | I2                          | <i>Flood</i>             | 9.76                  |
| M9.2                        | <i>Ebb</i>               | 0.51                  | C3                          | <i>Ebb</i>               | 11.00                 | R5                          | <i>Ebb</i>               | 6.41                  | M7                          | <i>Ebb</i>               | 6.24                  | I1                          | <i>Flood</i>             | 5.46                  |
| M7                          | <i>Ebb</i>               | 3.80                  | C4                          | <i>Ebb</i>               | 11.68                 | R6                          | <i>Ebb</i>               | 5.88                  |                             |                          |                       | I4                          | <i>Flood</i>             | 2.91                  |
| M6                          | <i>Ebb</i>               | 9.26                  | C5                          | <i>Ebb</i>               | 14.16                 | R7                          | <i>Ebb</i>               | 5.56                  |                             |                          |                       | I5                          | <i>Flood</i>             | 2.86                  |
| M5                          | <i>Ebb</i>               | 12.23                 | C6                          | <i>Ebb</i>               | 11.85                 | R8                          | <i>Ebb</i>               | 5.73                  |                             |                          |                       | I6                          | <i>Flood</i>             | 1.50                  |
| H5                          | <i>Ebb</i>               | 11.38                 | H2                          | <i>Ebb</i>               | 4.46                  | R9                          | <i>Ebb</i>               | 5.47                  |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
| C8                          | <i>Ebb</i>               | 15.09                 | H3                          | <i>Ebb</i>               | 4.98                  | R10                         | <i>Ebb</i>               | 5.57                  |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
| M4                          | <i>Ebb</i>               | 7.68                  | C7                          | <i>Ebb</i>               | 7.81                  | R11                         | <i>Ebb</i>               | 5.39                  |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
| M3                          | <i>Ebb</i>               | 5.55                  | H6                          | <i>Ebb</i>               | 13.65                 |                             |                          |                       |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
| M2                          | <i>Ebb</i>               | 6.18                  | H5                          | <i>Ebb</i>               | 13.56                 |                             |                          |                       |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
| M1                          | <i>Ebb</i>               | 2.21                  | <b>C8</b>                   | <b><i>Ebb</i></b>        | <b>17.69</b>          |                             |                          |                       |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
| H1                          | <i>Ebb</i>               | 7.01                  | C9                          | <i>Ebb</i>               | 12.62                 |                             |                          |                       |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
| C01F                        | <i>Flood</i>             | 8.06                  | C10                         | <i>Ebb</i>               | 11.79                 |                             |                          |                       |                             |                          |                       |                             |                          |                       |
|                             |                          |                       | C02F                        | <i>Flood</i>             | 7.14                  |                             |                          |                       |                             |                          |                       |                             |                          |                       |

Tabla 19. Profundidades máximas de todas las mediciones CTD.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Cedeño J., De la Cuadra T., Abata K. (2014). Cálculo de prisma de marea usando métodos no tradicionales. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/28795552>.
- Cândida S., Ruby J. & Dove V. (2002). Seasonal variation of tides, currents, salinity and temperatura along the coast of Mozambique. INAHINA – IPP. UNESCO – IOC.
- Cheng, P., A. Valle-Levinson, and H.E. de Swart. (2010). Residual Currents Induced by Asymmetric Tidal Mixing in Weakly Stratified Narrow Estuaries. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 2135–2147, doi: 10.1175/2010JPO4314.1.
- Friedrichs, C. T. (2002a). Applications of Scaling in Coastal/Estuarine Physical Oceanography: 13. Continental Shelf Research, Elsevier.
- Hansen, V.D. i Rattray, M.J. (1965). Gravitational circulation in Straits and estuaries. *J. Mar. Res.*, 23 104-122.
- Hearn, C. J. (1995). “Water Exchange between shallow estuaries and the ocean”, a Eutrophic Shallow Estuaries and Lagoons, 151-172. CRC Press, Boca Raton, FI USA.
- Hogueane, A.M., (1999). Sea level measurement and analysis in The Western Indian Ocean. National Report: Mozambique.
- Hogueane, A.M., (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 7(1): 69-82.
- INAHINA – Instituto Nacional de Hidrografia é Navegação (2017). Tabela de mares Inhambane.
- Manual docente de Ocean Data View para Oceanografía. Daura Vega Moreno y Francisco Machín (2017). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Martínez de Osés, Francesc X., (2006). Meteorología aplicada a la navegación. Volumen 139 de Politext. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Movellán, E. (2004). Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del río Ebro, (3): 51-59. Memoria de tesis. Universidad de Barcelona. España.
- Officer, C.B., 1983. “Physics of estuarine circulation”, an *Estuaries and enclosed seas*, 26, 15-41. Elsevier, Amsterdam.
- Palalane, J., (2016). Processes of long-term coastal evolution and their mathematical modelling - Application to the Mozambican coast. Doctoral Thesis (LUTVDG/TVVR-1065). Faculty of engineering, Lund University.



- Petroni, Ricardo V., (2005). Hidráulica marítima y de estuarios. 1: 37 pp. 1ª ed. Editorial Dunken, Buenos Aires.
- Pinet, Paul R. (1995). Invitation to Oceanography. 4<sup>th</sup> edition, Jones and Bartlett Publishers, Inc.
- Proyecto de cooperación 2017-U001: *“Recolzament per a les accions inicials per a la consolidació dels estudis d’Enginyeria Civil a la UP-Maxixe (Moçambic): desenvolupament d’un grup de recerca en l’àmbit de l’Enginyeria Marítima”*, apoyado por el CCD (Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC).
- Rattray, M. Jr. and Hansen, D.V. (1962). A similarity solution for circulation in an estuary. J. Mar. Res. 20, 121-133.
- Saetre, R. & Silva, A. Jorge da, (1982). Water masses and circulation on the Mozambique Channel. Rev. Inv. Pesq: 3-38.
- Unesco. 1981a. Escala práctica de salinidad 1978 y la Ecuación Internacional de estado del agua de mar 1980. Tech. Pap. Mar. Sci., 36: 25 pp.
- Valle-Levinson, A. (2010). Contemporary Issues in Estuarine Physics. Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-89967-3.

## 10. WEBGRAFÍA

- Calculador de distancias, <https://es.distance.to/>, 2017.
- Fondear S.L., Las corrientes de marea, <http://www.fondear.org/infonautic.asp>, 2008.
- Google Maps – Google.es, <https://www.google.es/maps>, 2017.
- Información climática y pluviométrica, <https://pt.climate-data.org/location/32368/>, 2018.
- Mapcarta, El mapa interactivo, <https://mapcarta.com/es/14435730>, 2018.
- Schlitzer, R., Ocean Data View, <http://odv.awi.de>, 2014.
- Tabla de mareas, <http://www.tablademareas.com/mareas/corrientes-marea>, 2018.